

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

А 74957

БИБЛИОТЕКА
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА



М. В. МЕЙКЛЯР

КАК РАБОТАЕТ МЕТАЛЛ ПАРОВОГО КОТЛА

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1961

Д 74957

БИБЛИОТЕКА ТЕПЛОТЕХНИКА

Выпуск 8

М. В. МЕЙКЛЯР

КАК РАБОТАЕТ МЕТАЛЛ ПАРОВОГО КОТЛА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

В книге приведены способы изготовления и условия эксплуатации поверхностей нагрева и барабанов паровых котлов, а также условия, при которых возникает разрушение металла при неправильном изготовлении деталей, их чрезмерном нагреве, коррозии, эрозии и т. п. По отдельным вопросам даны практические рекомендации.

Книга рассчитана на широкий круг работников энергетической промышленности и прежде всего на рядовых работников котельных цехов электростанций, промышленных предприятий, а также на учащихся и работников котлостроительных заводов.

6П2.22 Мейкляр Михаил Владимирович

М 45 Как работает металл парового котла. М.—Л, Госэнергоиздат, 1961.
95 с. с черт. и илл. (Б-ка теплотехника. Вып. 8).
6П2.22

Редактор Е. А. Троянский

Техн. редактор Н. И. Борунов

Сдано в набор 3/XI 1960 г.

Подписано к печати 11/I 1961 г.

Т-01611 Бумага 84×108¹/₃₂

4,92 печ. л.

Уч. изд. л. 5,4

Тираж 12 000 экз.

Цена 27 коп.

Зак. 2568

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Вышедшие до настоящего времени книги «Библиотеки теплотехника» уже дали читателям основные сведения о конструкции и физико-химических процессах, происходящих в современных паровых котлах, турбинах, двигателях внутреннего сгорания и т. п. Ныне Издательство, не приостанавливая выпуска подобных книг, намечает издание ряда новых книг, которые также рассчитаны на широкий круг читателей, но в них будут более углубленно рассматриваться отдельные специальные проблемы.

Настоящая книга является одним из первых изданий этого типа. Она посвящена сравнительно узкому вопросу поведения металла при эксплуатации паровых котлов. В книге приведены различные сведения о свойствах сталей и изменении этих свойств при неправильном изготовлении деталей котла, чрезмерном их нагреве, коррозии и т. п. Большое количество имеющихся в книге конкретных примеров разрушения металла в паровых котлах показывает, насколько полезны могут быть такие сведения для рядовых работников электростанций.

Рассматриваемый в книге круг вопросов находится как бы на стыке теплотехники, металловедения и котлостроения. Популярная книга такого профиля публикуется впервые, и Издательство надеется, что изложенные в ней материалы будут полезными для многих квалифицированных работников.

Издательство просит читателей присылать свои отзывы на книгу по адресу: Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10, Госэнергоиздат.

СОДЕРЖАНИЕ

Глава первая. Строение и свойства металлов	5
1. Строение (структура) железа	5
2. Механические свойства металлов	7
3. Строение стали	13
4. Влияние легирования	16
5. Аустенитная сталь	18
6. Способы повышения жаропрочности котельных сталей	21
7. Маркировка легированных сталей	22
Глава вторая. Условия работы металла паровых котлов	23
8. Ползучесть стали	23
9. Работа цилиндрических сосудов	25
10. Влияние на металл чрезмерного нагрева	28
Глава третья. Повреждения поверхностей нагрева котла	30
11. Влияние способа изготовления на прочность цельнотянутых труб	30
12. Влияние условий изготовления поверхностей нагрева на их прочность	38
13. Дуговая электросварка деталей котла	44
14. Повреждения экранных труб вследствие нарушения циркуляции воды	47
15. Повреждения экранных труб при наличии в них накипи	50
16. Повреждения пароперегревателей	52
17. Эрозия поверхностей нагрева	56
Глава четвертая. Повреждения котельных барабанов и коллекторов	60
18. Влияние технологии изготовления барабанов на их прочность	60
19. Повреждения в месте присоединения концов труб к барабанам и коллекторам котла	66
20. Влияние чрезмерного напряжения в металле	71
Глава пятая. Тепловая усталость котельной стали	73
Глава шестая. Коррозия стали	78
21. Кислородная коррозия	79
22. Паровая коррозия	80
23. Щелочная хрупкость	82
24. Коррозия труб под слоем шлама	83
25. Стояночная коррозия	87
26. Наружная коррозия экранных труб	88
27. Коррозия экранов при сверхвысоком давлении	91
28. Сернистая коррозия труб хвостовых поверхностей нагрева	93
Литература	95

ГЛАВА ПЕРВАЯ СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

1. СТРОЕНИЕ (СТРУКТУРА) ЖЕЛЕЗА

В настоящей книге рассматриваются конкретные вопросы, связанные с работой стальных деталей парового котла. Но для изучения этих сугубо практических вопросов необходимо знать общие сведения, касающиеся строения стали и ее свойств.

В схемах, показывающих строение металлов, атомы иногда изображают в виде соприкасающихся друг с другом шаров (рис. 1). Такие схемы показывают расстановку атомов в металле, но в них трудно наглядно показать расположение атомов друг относительно друга. Более удобны схемы, в которых атомы изображены в виде кружков произвольных размеров, находящихся на некотором расстоянии друг от друга (рис. 2).

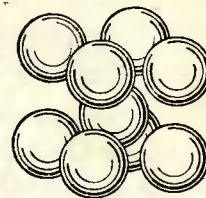


Рис. 1. Расположение атомов в элементарной кристаллической ячейке альфа-железа.

В твердых телах атомы располагаются друг относительно друга в определенном порядке. В частности, для железа характерны следующие два основных вида расположения атомов. При обычной температуре мы имеем дело с так называемым альфа-железом (α -железо, рис. 2,а). При нагреве альфа-железа до 910°C происходит перестройка атомов, в результате чего возникает так называемое гамма-железо (γ -железо, рис. 2,б). Остывание гамма-железа сопровождается обратной перестройкой атомов в альфа-структуру.

Схемы, показанные на рис. 2, характеризуют взаимную связь лишь нескольких соседних атомов. Эти атомы образуют элементарную ячейку кристаллической

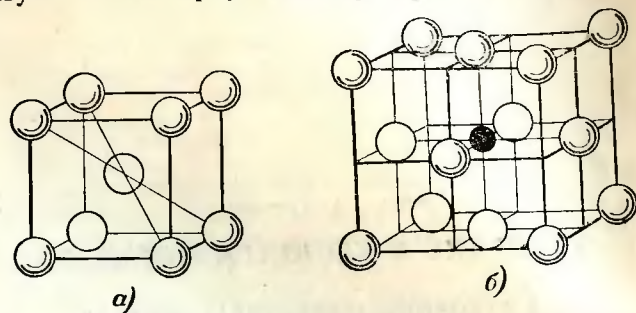


Рис. 2. Схемы элементарной кристаллической ячейки железа.
а и б — элементарные кристаллические ячейки соответственно альфа- и гамма-железа (черным кружком показано расположение атома углерода, растворенного в гамма-железе).

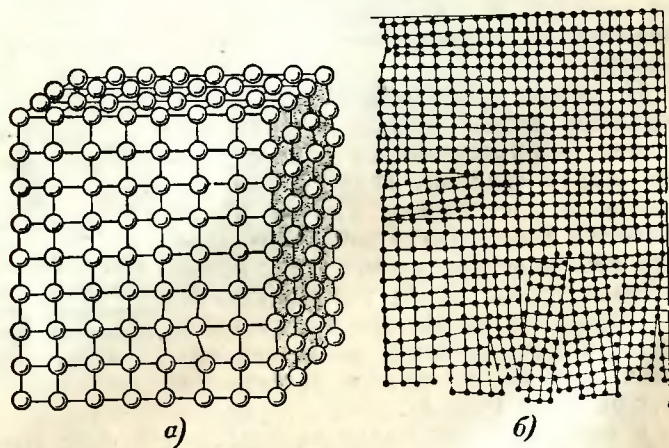


Рис. 3. Схема строения участка кристаллической решетки.
а — схема сопряжения элементарных ячеек альфа-железа;
б — более упрощенная схема, показывающая не вполне правильное строение кристаллической решетки.

решетки, часть которой показана схематически на рис. 3,а. Несколько большее количество элементарных ячеек изображено в еще более схематическом виде на рис. 3,б, на котором, в частности, видно не вполне пра-

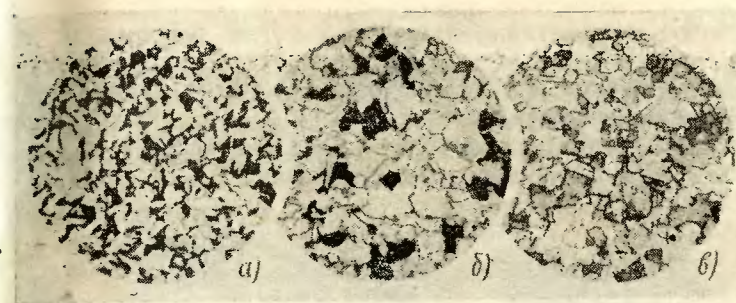


Рис. 4. Структура трех основных типов котельных сталей при увеличении в 75 раз.

а — углеродистая сталь марки 2; б — легированная сталь марки 12ХМФ перлитного класса; в — аустенитная сталь марки 1Х18Н12Т.

вильное строение действительной кристаллической решетки.

Если отполированную и протравленную поверхность металла рассматривать под микроскопом, то можно увидеть, что металл состоит из отдельных зерен (кристаллитов; рис. 4).

2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

Высокая прочность, т. е. способность деталей или конструкций выдерживать нагрузки без разрушения, является основным требованием, предъявляемым к конструкционным сталям вообще и котлостроительным материалам в частности.

По мере увеличения нагрузки происходит изменение размеров (деформация) элементов парового котла. Например, при растяжении увеличивается их длина и уменьшается площадь поперечного сечения. Если сила, вызывающая эту деформацию, невелика, то после прекращения ее действия элемент парового котла полностью восстанавливает свои первоначальные размеры. Такие деформации называются упругими. При этом не происходит изменения строения кристаллической решетки, изменяются лишь расстояния между атомами.

Упругая деформация пропорциональна приложенной нагрузке. Эту особенность можно видеть, например, в пружинных весах, у которых деформация пружины пропорциональна весу груза.

При возрастании нагрузки упругая деформация может увеличиваться лишь до определенного предела, после которого в стали происходят необратимые изменения. Эти изменения заключаются в том, что внутри зерен (кристаллитов) происходит смещение отдельных слоев атомов относительно друг друга (рис. 5,а). Поверхность

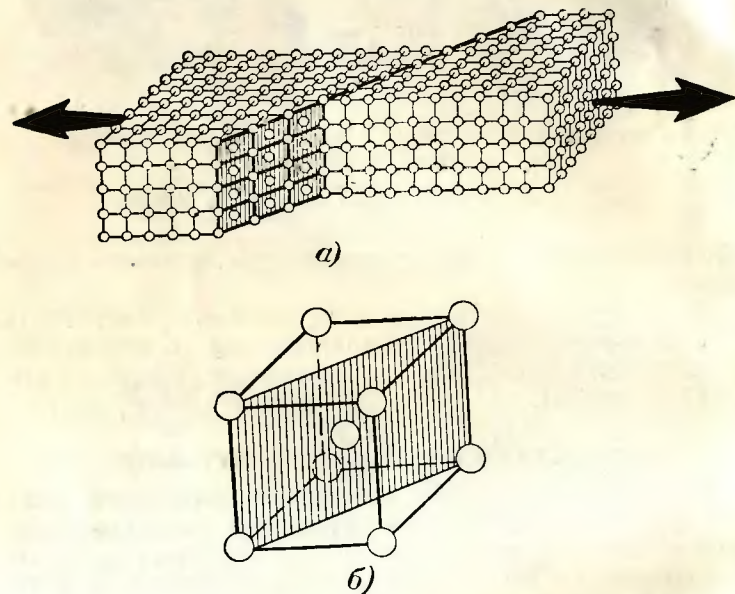


Рис. 5. Упрощенная схема начального момента сдвига атомов альфа-железа при пластической деформации (черные стрелки показывают направление внешних сил).

а — расположение плоскости сдвига в группе кристаллических ячеек; б — одна из возможных плоскостей сдвига в элементарной кристаллической ячейке (заштрихована).

такого сдвига в альфа-железе располагается по диагональным плоскостям элементарных кристаллических ячеек (рис. 5,б). При этом перемещение слоев металла происходит в направлении, не совпадающем с направлением действия внешних сил, а величина перемещений во много раз превышает межатомные расстояния. Линии сдвига ясно видны под микроскопом (рис. 6,а).

Когда действие нагрузки прекращается, перемещенные слои атомов остаются в новом положении и прежняя

форма кристаллитов не восстанавливается. Поэтому после приложения больших нагрузок кристаллиты становятся удлиненными, вытянутыми в одну сторону (рис. 6,б), что приводит к изменению размеров детали.

Сдвиг слоев атомов лишь в начальный момент является их скольжением друг относительно друга. В зоне сдвига кристаллическая решетка искажается, что препятствует дальнейшему сдвигу и, как правило, приводит к увеличению прочности металла

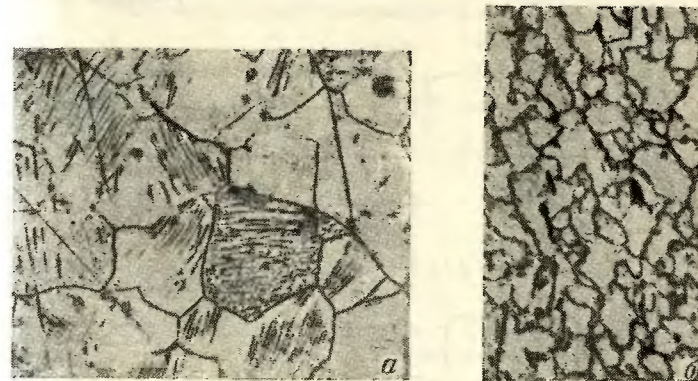


Рис. 6. Пластическая деформация зерен железа.

а — линии сдвига в чистом железе [Л. 11]; б — изменение формы зерен феррита при большой пластической деформации (увеличено в 200 раз).

Следует иметь в виду, что механизм пластической деформации гораздо сложнее, чем схематически изложено выше.

Для сравнения прочности различных металлов изготовляют образцы в виде крутых стержней, которые растягивают на особых машинах. Если в каждый момент растяжения производить измерения приложенной к образцу нагрузки P и величины приращения длины образца Δl , то можно построить график, который называется первичной диаграммой растяжения (рис. 7). Такая диаграмма показывает, что упругие деформации могут увеличиваться только до определенного предела (точка T на кривой рис. 7). Как указывалось, дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается появлением пластических деформаций, которые не исчезают после снятия нагрузки.

Это можно представить следующим образом. Пусть стержень (образец) зажат на одном конце и растягивается внешней силой P (рис. 8) на другом конце. При максимальной упругой деформации стержень удлиняется на величину m . На рис. 8,а внешняя сила вызывает удли-

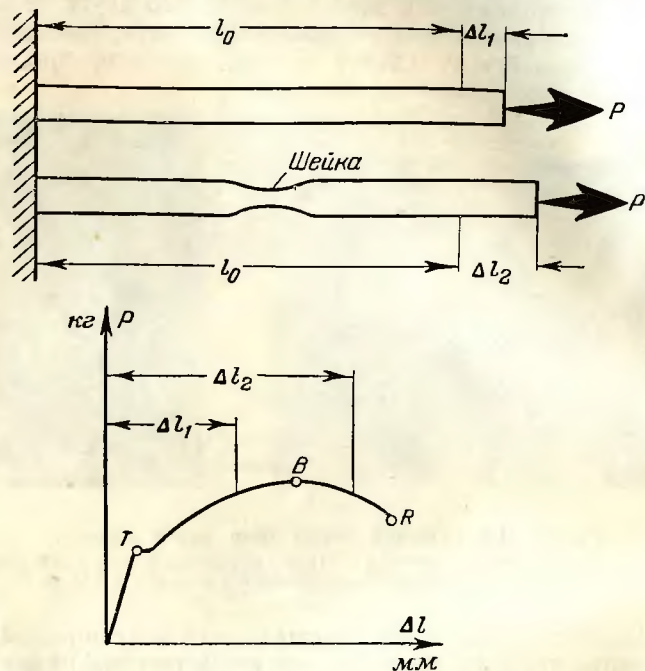


Рис. 7. Первичная диаграмма растяжения металла. Схематически показаны условия образования шейки в растягиваемом образце.

нение, меньшее m . Когда действие этой силы прекращается, стержень укорачивается до начальной длины (рис. 8,б).

На рис. 8,в изображено действие внешней силы P_1 , при котором удлинение стержня превышает величину m . Когда эта сила перестает действовать, стержень укорачивается лишь на величину n и остается длиннее, чем до растяжения (рис. 8,г). Если снова нагрузить стержень такой же растягивающей силой, он удлинится на ту же величину n (рис. 8,д); при снятии нагрузки он укоротится так же, как и в первый раз.

10

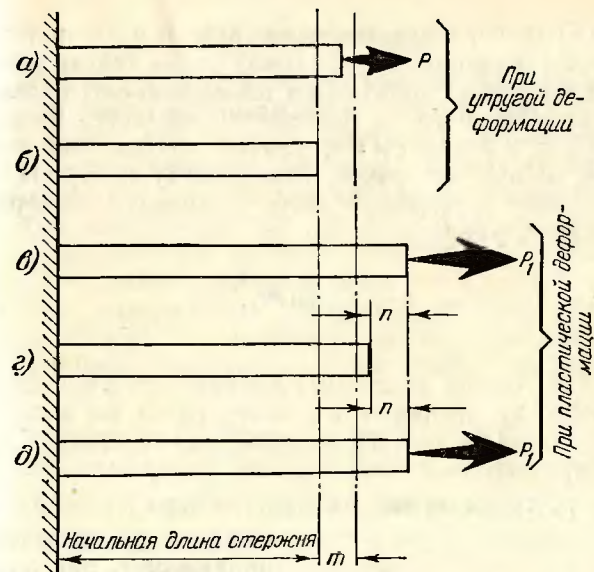


Рис. 8. Схема удлинения стального стержня при упругой и пластической деформациях.

При чрезмерном увеличении внешних сил нарастание пластической деформации приводит к появлению трещин и металл начинает разрушаться.

Отрезок от вертикальной оси до точки B (см. рис. 7) соответствует деформации при максимальной нагрузке, которую может выдержать образец до разрушения. Если приложена эта нагрузка, то в образце появляется местное утонение (шейка). С этого момента нарастание удлинения образца может происходить при уменьшающейся нагрузке до тех пор, пока не произойдет разрушение (точка R на рис. 7). С увеличением площади поперечного сечения образец будет выдерживать более высокие нагрузки.

Прочность материалов обычно характеризуют нагрузкой P (кг) на единицу площади первоначального поперечного сечения образца F_0 (мм²). Это отношение называется напряжением и измеряется в килограммах на квадратный миллиметр (кг/мм²), т. е.

$$\sigma = \frac{P}{F_0} \text{ кг/мм}^2.$$

Для сравнения пластических свойств материалов (например, их остаточного удлинения после снятия растягивающей нагрузки) пользуются также относительными величинами. Одной из таких величин является относительное удлинение, равное приращению длины образца Δl под нагрузкой, отнесенному к первоначальной его длине l_0 . Относительное удлинение, измеряемое в процентах, равно:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%$$

Если построить диаграмму растяжения в координатах σ и ε (рис. 9), то она будет иметь такой же вид, как и предыдущая (см. рис. 7), построенная в координатах P и Δl . Характерными точками этой диаграммы являются σ_T и σ_B . Первая из них называется пределом текучести и представляет

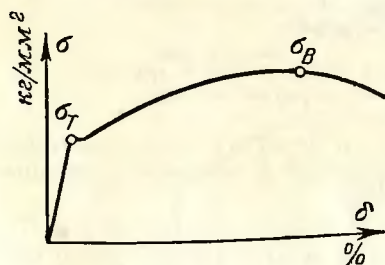


Рис. 9. Диаграмма растяжения металла в координатах σ и ε .

напряжением, при котором удлинение испытываемого образца происходит без увеличения напряжения (на диаграмме этот короткий участок кривой, параллельный горизонтальной оси, называется площадкой текучести). Вторая точка называется пределом прочности σ_B ; она характери-

зует максимальное напряжение, которое выдерживает образец до его разрушения. Пределы текучести и прочности металлов, так же как напряжение, измеряются в килограммах на квадратный миллиметр и используются в расчетах на прочность.

Рассмотренный процесс растяжения образца происходит при медленном увеличении нагрузки. Применяется также испытание металла при ударном приложении нагрузки. В этом случае работа, затраченная на разрушение и отнесенная к единице площади поперечного сечения образца, носит название ударной вязкости.

3. СТРОЕНИЕ СТАЛИ

Чистое железо, в котором суммарное содержание различных примесей не превышает сотых долей процента, представляет собой мягкий металл (немного прочнее меди). Его получение не связано с особыми техническими трудностями. Однако для применения в котлостроении и большинстве других отраслей промышленности в железо необходимо вводить добавки различных веществ, улучшающих его свойства.

Железо, содержащее примерно до 2% углерода, называется сталью. В котлостроении применяют сталь с содержанием углерода около 0,1—0,25% (табл. 1).

Таблица 1

Марки стали	20	15ХМ	12ХМФ	16ГНМ	22К
Наименование элементов	Содержание, %				
Углерод	0,17—0,25	0,09—0,16	0,08—0,15	0,12—0,18	0,19—0,26
Марганец	0,35—0,65	0,40—0,70	0,4—0,7	0,8—1,1	0,75—1,00
Кремний	0,17—0,37	0,17—0,37	0,15—0,35	0,17—0,37	0,2—0,4
Молибден	—	0,40—0,60	0,25—0,35	0,40—0,55	—
Хром	До 0,3	0,8—1,1	0,9—1,2	До 0,3	До 0,4
Ванадий	—	—	0,15—0,3	—	—
Никель	—	До 0,3	До 0,3	1,0—1,3	До 0,3
Медь	До 0,25	„ 0,25	„ 0,25	0,15—0,25	„ 0,3
Сера	„ 0,045	„ 0,04	„ 0,04	До 0,04	„ 0,045
Фосфор	„ 0,04	„ 0,04	„ 0,04	„ 0,035	„ 0,045

Кроме углерода, в котельных сталях обычно содержится небольшое количество марганца и кремния, а иногда и других металлов. В ничтожном количестве имеются и неудаленные остатки вредных примесей — серы и фосфора.

При остывании расплавленной стали образуется твердый раствор примесей в железе, в котором сохраняется кристаллическая решетка железа. Кроме того, примеси, содержащиеся в стали, могут вступать в химическое взаимодействие с железом. При этом появляются новые соединения с собственной, иногда весьма сложной кристаллической решеткой.

Из различных химических соединений железа с другими веществами упомянем о его соединении с углеродом, известном под названием карбида железа или цементита. Химическая формула цементита Fe_3C не отражает его сложного кристаллического строения, которое

весьма трудно изобразить графически. Вокруг каждого атома углерода имеется по несколько атомов железа. На рис. 10, чтобы не затемнять чертежа, показана только часть этих атомов. Цементит имеет высокую твердость (он царапает стекло).

Рассмотрим теперь вопрос о том, как образуется характерный для стали твердый раствор углерода в железе. Как уже упоминалось, растворение добавляемых веществ в основном металле происходит в период, когда металл находится в жидком состоянии. Когда металл затвердевает, атомы добавляемой примеси могут занять отдельные места (узлы) в кристаллической решетке, которые без них были бы заняты атомами самого железа. Иногда атомы добавляемой примеси размещаются в промежутках между атомами основного металла. В первом случае получается так называемый твердый раствор замещения, а во втором — твердый раствор внедрения.

Чтобы атом добавляемого вещества мог прочно занять место в «чужой» для него кристаллической решетке, необходимо несколько условий. Прежде всего требуется, чтобы диаметр этого атома соответствовал занимаемому им месту. В твердом растворе замещения диаметр «постороннего» атома должен мало отличаться от диаметра атома железа. В растворе же внедрения он должен иметь гораздо меньшие размеры.

Рассматривая твердый раствор углерода в железе, следует указать, что, не являясь металлом, углерод имеет кристаллическую решетку, которая значительно отличается от кристаллической решетки железа. Поэтому углерод не может образовать с железом твердого раство-

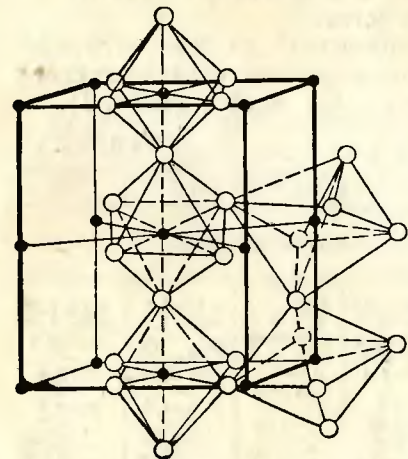


Рис. 10. Упрощенная схема кристаллической структуры цемента (светлые кружочки соответствуют атомам железа, черные — атомам углерода).

ра замещения. В альфа-железе затруднено образование твердого раствора внедрения углерода. Дело в том, что в свободном состоянии атом углерода имеет диаметр $1,54 \cdot 10^{-7}$ мм; диаметр же так называемой поры, т. е. свободного пространства в кристаллической решетке альфа-железа, равен $0,62 \cdot 10^{-7}$ мм. Поэтому в альфа-железе растворяется лишь ничтожное количество углерода, занимающего свободное пространство в местах, где в решетке нарушается правильное кристаллическое строение (см. рис. 3,б). Этим, вероятно, объясняется то, что максимальная растворимость углерода по-разному оценивалась различными исследователями. Во всех случаях она измерялась сотыми долями процента.

Углерод гораздо легче растворяется в железе, нагретом до высокой температуры и имеющем гамма-структуру, так как в центре каждой ячейки кристаллической решетки гамма-железа имеется пора диаметром $1,02 \cdot 10^{-7}$ мм. При размещении в такой поре атома углерода происходит некоторое увеличение размеров соответствующих ячеек кристаллической решетки.

На рис. 4,а представлен полученный при помощи микроскопа фотоснимок поверхности котельной стали марки 20, тщательно отшлифованной и протравленной кислотой. Как видно из фотоснимка, сталь состоит из отдельных светлых зерен (кристаллитов) альфа-железа и темных зерен. Зерна альфа-железа в стали называются ферритом (по-латыни: «феррум» — железо), а темные зерна — перлитом (от слова «перламутр», на который они похожи в чистом виде).

При очень большом увеличении можно обнаружить, что перлит имеет вид чередующихся темных и светлых полосок. Исследования подтверждают неравномерность его структуры: перлит состоит из чередующихся слоев альфа-железа и цементита, т. е. из слоев чистого железа и химического соединения железа с углеродом.

Чем больше углерода в стали, тем больше перлита образуется при ее остывании. Металловеды по фотографии микроструктуры стали могут довольно точно определить содержание в ней углерода.

Растворенные элементы могут перемещаться в твердой стали на некоторое расстояние, которое хотя и представляется ничтожным в наших обычных масштабах,

все же весьма велико по сравнению с размерами самих атомов. Такое перемещение (диффузия) атомов ускоряется с повышением температуры металла. Диффузия и самодиффузия (перемещение атомов самого железа) в стали лежат в основе многих процессов, уменьшающих прочность стальных деталей, которые работают длительное время при высокой температуре.

4. ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ

Качественные показатели котельной стали могут существенно измениться даже при ничтожной, исчисляемой долями процента добавке различных элементов. Это свойство добавок нельзя было бы объяснить, если бы добавляемые вещества полностью и равномерно растворялись в основном металле. Однако марганец, хром, молибден, вольфрам, ванадий, титан и другие металлы лишь частично переходят в твердый раствор. Значительный процент каждого из этих элементов образует химические соединения с углеродом или другими примесями.

Наибольшее значение имеет взаимодействие добавляемых металлов с углеродом. Эти химические соединения (карбиды) подобно карбиду самого железа (цементиту) увеличивают прочность стали. Отдельные добавки улучшают и другие свойства стали: повышают ее жаропрочность (т. е. прочность при высокой температуре), противодействуют коррозии и т. п.

В зависимости от содержания и количества этих добавок котельные стали делят на следующие две группы: углеродистые, в которых, кроме углерода, имеется определенное количество марганца и кремния, и легированные, в которых содержится еще и некоторое количество хрома, молибдена, никеля и других металлов.

Ниже коротко рассмотрено влияние на свойства стали элементов, являющихся постоянными примесями. Кроме того, сведения о влиянии некоторых элементов приведены в табл. 2.

Влияние углерода. С увеличением содержания в стали углерода возрастает количество перлита (а следовательно, и цементита). Сталь при этом становится более прочной и менее пластичной. Высокая прочность является весьма полезным свойством металла; поэтому применение сортов стали с пониженным содержанием углерода нежелательно. Вместе с тем нежелательно и чрезмерно

Наименование примесей	Углерод	Марганец	Кремний	Никель	Хром	Вольфрам	Ванадий	Молибден
Увеличение твердости	+	+	+		+	+		+
Увеличение пластичности . . .				+			+	
Сопротивление истиранию . .		+		+	+			
Понижение теплопроводности		+			+			
Уменьшение склонности к коррозии				+	+			

большое содержание углерода в стали, так как слишком твердый и сравнительно мало пластичный металл хуже сопротивляется различным механическим деформациям, возникающим, например, при защемлении экранных труб при растопке котла или неравномерном нагревании барабана в период растопки. Кроме того, высокое содержание углерода в стали отрицательно сказывается на прочности сварных соединений.

Для изготовления поверхностей нагрева котла очень широко применяется углеродистая сталь марки 20, в которой содержание углерода допускается не более 0,25%. Несколько большее содержание углерода допускается в стали, из которой изготовляют каркас и обшивку котла, площадки обслуживания и другие конструкции, не подверженные нагреванию до высокой температуры.

В легированных сталях углерод обычно содержится в еще меньшем количестве, чем в стали марки 20. Например, в применяемой для изготовления пароперегревателей современных котлов стали марки 12ХМФ содержание углерода не должно превышать 0,15%.

Влияние марганца. Вопрос о выборе оптимального содержания марганца в котельных сталях до сих пор окончательно не решен. Марганец подобно углероду повышает прочность стали и несколько уменьшает ее пластичность. Кроме того, при плавке стали в мартеновской печи марганец способствует очистке металла от серы, с которой он образует легко удаляемый шлак. Отрицательное действие марганца заключается в уменьшении

теплопроводности стали, вследствие чего, например, в барабане котла более вероятно возникновение трещин при местном нагреве или охлаждении какого-либо его участка. В экранах это может повести к увеличению разности температур между частями труб, обращенными в топку и к обмуровке.

На отдельных электростанциях работают паровые котлы, у которых барабаны изготовлены из стали, содержащей более 1% марганца. Все же добавку марганца в сталь обычно ограничивают долями процента. Применяемая для изготовления барабанов сталь марки 22К содержит марганца 0,75—1%. Еще меньше марганца содержит сталь марки 20. В большинстве легированных сталей также содержится лишь небольшое количество марганца.

Влияние кремния. При плавке в металлургической печи кремний, как и марганец, применяется для раскисления: соединяясь с растворенным в стали кислородом, он образует легко удаляемые шлаки, всплывающие на поверхность жидкого металла. Почти во всех котельных сталях содержится небольшое количество кремния, остающегося после раскисления, но иногда содержание его увеличивают для повышения жаростойкости стали, т. е. для повышения максимальной температуры, при которой не приходится опасаться интенсивного образования окалины.

На свойства стали кремний влияет аналогично углероду и марганцу: при его добавлении увеличивается прочность и понижается пластичность.

5. АУСТЕНИТНАЯ СТАЛЬ

Особые результаты дает добавка в сталь никеля, имеющего такой же тип кристаллической решетки, как и гамма-железо. При высокой температуре, когда у обоих металлов структура кристаллической решетки одинакова, никель образует в стали устойчивый твердый раствор замещения. При охлаждении никель стремится сохранить собственное кристаллическое строение и тормозит перестройку гамма-железа в структуру альфа-железа. Если добавить в сталь до 26% никеля, гамма-структура сохраняется при охлаждении стали до комнатной температуры.

Присадка никеля не только не увеличивает прочности стали при нагреве до высокой температуры, но даже уменьшает ее по сравнению с углеродистой сталью (рис. 11). Поэтому целесообразно вместе с никелем в сталь вводить хром, при наличии которого уменьшается количество никеля, необходимого для сохранения гамма-структуры стали.

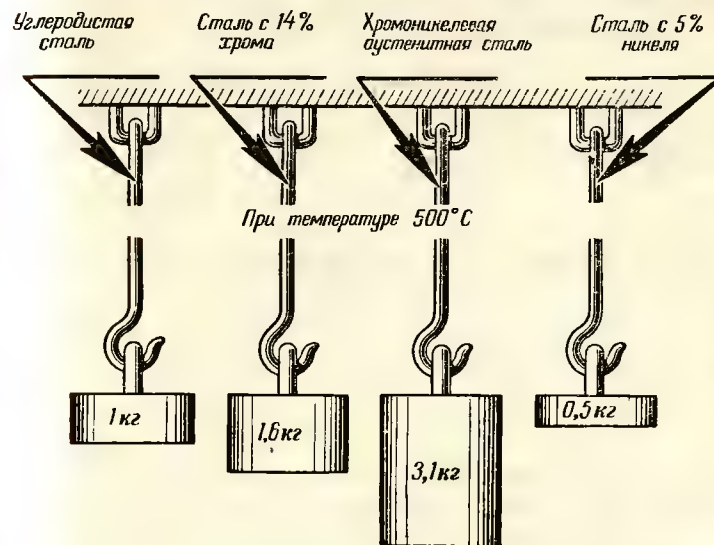


Рис. 11. Сравнение нагрузки, которая может быть допущена для стержней, изготовленных из разных сортов стали и нагретых до температуры 500°С [Л. 12].

Сталь, сохраняющую гамма-структуру при обычной температуре, называют аустенитной в отличие от перлитной стали, у которой при охлаждении происходит описанная выше перестройка кристаллической решетки. В настоящее время аустенитную сталь широко применяют в различных отраслях техники, начиная от строительства кислотоупорных сосудов для химической промышленности до художественной отделки зданий (например, на станции «Маяковская» московского метро). В энергетике из аустенитной стали делают элементы оборудования, работающие при наиболее вы-

сокой температуре, в частности выходную часть пароперегревателя парового котла.

У большинства котельных аустенитных сталей суммарное содержание хрома и никеля составляет 30% общего веса металла (табл. 3). Таким образом, количество легирующих добавок в аустенитной стали во много раз больше, чем, например, в перлитной стали марки 12ХМФ, в которой суммарное содержание марганца, хрома, молибдена и ванадия не превышает 3%.

Таблица 3

Марка стали	1Х18Н9Т	1Х18Н12Т
Наименование элементов	Содержание, %	
Углерод	До 0,12	0,08—0,12
Марганец	" 1,5	1,0—2,0
Кремний	" 1,0	До 0,75
Хром	17—20	17—18,5
Никель	9—11	11—13
Титан	До 0,8	До 0,65
Сера	" 0,030	" 0,020
Фосфор	" 0,035	" 0,035

Аустенитная сталь стоит в 2—5 раз дороже хромомолибденовой и в 5—10 раз дороже, чем обычная углеродистая сталь. Поэтому расход аустенитной стали стремятся по возможности сократить. Однако применение аустенитной стали для труб пароперегревателя позволяет повысить температуру перегретого пара, благодаря чему возрастает экономичность электростанций и снижается стоимость вырабатываемой на них электроэнергии.

В кристаллической решетке гамма-железа атомы «упакованы» более плотно, чем в решетке альфа-железа, поэтому при высокой температуре в аустенитной стали в меньшей мере, чем в перлитной, развиваются разупрочняющие процессы. К тому же в аустенитной стали почти весь углерод весьма прочно химически соединен с легирующими элементами. Кроме высокой жаропрочности (прочности при высокой температуре), аустенитная сталь должна иметь и значительную жаростойкость (сопротивление окислению при высокой температуре) аустенитной стали.

Начальная стадия процесса окисления заключается в химическом соединении кислорода с поверхностным слоем металла. В дальнейшем на поверхности стали образуется пленка окислов и процесс окисления может продолжаться только в случае систематического разрушения этой пленки или при прохождении кислорода через нее. Весьма прочную и в то же время непроницаемую для кислорода пленку образуют окислы хрома; поэтому добавка в сталь большого количества хрома не только позволяет увеличить ее прочность при высокой температуре, но и обеспечить высокую жаростойкость.

Кроме никеля и хрома, в аустенитную сталь вводят небольшое количество других легирующих добавок, еще более улучшающих ее характеристики. К таким добавкам обычно относятся титан, вольфрам и ниобий.

6. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОСТИ КОТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

В настоящее время имеется тенденция дальнейшего повышения температуры перегретого пара на электростанциях. Необходимое для этого увеличение жаропрочности металла может быть достигнуто различными способами.

Жаропрочность котельной стали можно повысить некоторыми другими способами легирования (например, добавкой бора или редкоземельных элементов).

Дальнейшее значительное повышение жаропрочности элементов котла может быть достигнуто применением для их изготовления различных сплавов, в которых основным металлом является не железо, а кобальт и никель. Еще более высокой жаропрочностью обладают сплавы, в основе которых лежит тугоплавкий молибден. Внедрению этих сплавов в котлостроение препятствует прежде всего их высокая стоимость (кобальт примерно в 10 раз дороже хрома и никеля).

При проектировании современных мощных электростанций всегда определяют экономическую целесообразность повышения стоимости оборудования за счет применения отдельных сортов жаропрочной стали. Это повышение стоимости оправдывается тогда, когда оно перекрывается экономией топлива, получаемой благодаря применению высококачественных металлов.

В СССР условные обозначения характеризуют примерный состав сталей. Эти обозначения состоят из букв и цифр. Каждая буква указывает на наличие в стали какого-либо легирующего элемента. Цифры, стоящие до первой буквы, указывают на содержание углерода в сотых долях процента, а цифры, поставленные за буквой, характеризуют содержание легирующего элемента в целых процентах. Если какой-нибудь элемент содержится в количестве, меньшем или близком к 1%, то цифра за его обозначением отсутствует.

Условные обозначения элементов, входящих в сталь, следующие:

Б — ниобий;	Р — бор;
В — вольфрам;	С — кремний;
Г — марганец;	Т — титан;
Д — медь;	Ф — ванадий;
К — кобальт;	Х — хром;
М — молибден;	Ц — цирконий;
Н — никель;	Ю — алюминий;
П — фосфор;	

Так, например, обозначение стали 15ХМ означает, что в этой стали содержится (в среднем) 0,15% углерода и имеется небольшая присадка хрома и молибдена. По обозначению 12ХМФ можно видеть, что в данной стали содержится около 0,12% углерода; кроме хрома и молибдена, в ней содержится небольшое количество ванадия.

Иногда эти обозначения несколько сокращают: например, в стали марки 1Х18Н12Т среднее содержание углерода составляет около 0,1%, но в обозначении перед первой буквой стоит цифра 1, а не 10.

Иногда в конце обозначения имеется буква А. Такая, например, сталь марки 25Х2МФА, применяемая для изготовления болтов и шпилек, работающих при температуре выше 500°С. Наличие буквы А показывает, что в металле содержится очень мало вредных примесей (серы и фосфора) и что при получении стали особенно тщательно соблюдались все правила, обеспечивающие ее высокое качество.

УСЛОВИЯ РАБОТЫ МЕТАЛЛА ПАРОВЫХ КОТЛОВ

8. ПОЛЗУЧЕСТЬ СТАЛИ

Большинство стальных элементов паровых котлов несет ту или иную нагрузку и, кроме того, работает при высокой температуре. С повышением температуры прочность стали снижается вследствие возникновения различных разупрочняющих процессов. Изменение прочности стали с повышением температуры наглядно показано на рис. 12.

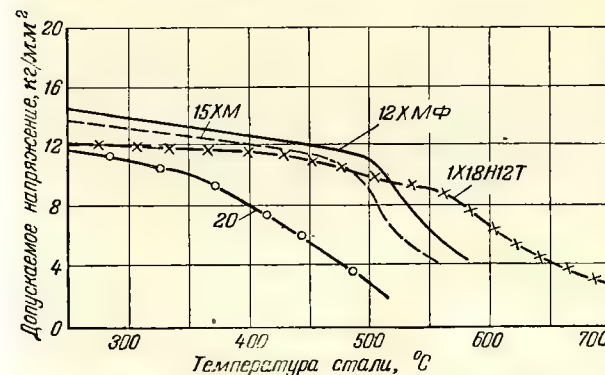


Рис. 12. Допускаемые напряжения для различных марок котельной стали.

Но действие высокого нагрева не ограничивается уменьшением механической прочности стали. Ее пластическая деформация не всегда происходит в соответствии с описанными выше закономерностями. Например, при длительной работе стального паропровода наблюдается постепенное, хотя и незначительное, увеличение его диаметра, происходящее и в том случае, когда напряжения в металле меньше предела текучести.

Процесс постепенного увеличения деформации при постоянных нагрузке и температуре называется ползучестью металла.

Если стальная деталь длительно работает под нагрузкой при нагреве до температуры выше 500°С, то по

результатам измерения ее деформации через определенные промежутки времени можно построить зависимость, которая называется первичной кривой ползучести (рис. 13). На этой кривой различают три основных участка: *аб* — участок неуставившейся скорости ползучести; *бв* — участок равномерной скорости ползучести и *вг* — участок разрушения.

Определив в результате испытаний наклон к горизонтальной оси участка *бв* равномерной скорости ползучести, можно вычислить скорость ползучести $u_{\text{п}}$ как частное от деления относительной деформации ϵ [%] на промежуток времени τ [ч], т. е.

$$u_{\text{п}} = \frac{\epsilon}{\tau} [\%/ч].$$

Зная скорость ползучести детали, можно подсчитать, за сколько часов ее работы произойдет наибольшая допустимая величина относительной деформации (в паровых котлах допускается $\epsilon = 1\%$).

Если деталь пароперегревателя рассчитывается на работу в течение 100 000 ч (около 12 лет), то можно путем предварительных испытаний образцов определить, какому напряжению должна подвергаться деталь для того, чтобы за 100 000 ч ее деформация не превышала 1%, т. е. чтобы скорость ползучести была не более $10^{-5} \%/ч$.

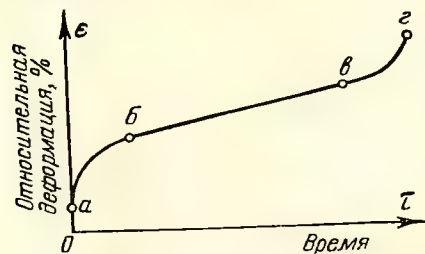


Рис. 13. Первичная кривая ползучести металла.

Деформация в результате ползучести также не может происходить беспрестанно, так как нарастание ее приводит к возникновению трещин и разрушению металла. Поэтому на электростанциях высокого давления необходимо вести систематический контроль за ползучестью металла коллекторов пароперегревателей паровых котлов и трубопроводов перегретого пара. Для этого к тру-

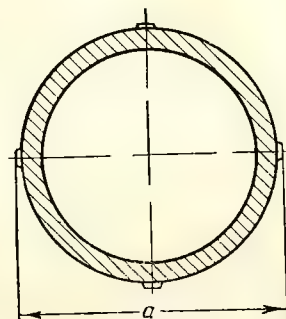


Рис. 14. Схема установки бобышек на паропроводе для контроля за ползучестью металла.

бам приваривают бобышки (рис. 14) и периодически измеряют расстояние *а* между ними. Если ползучесть превышает допустимую, участок трубы или коллектор заменяют новым.

Явление ползучести еще недостаточно изучено, но считается очевидным, что оно является следствием нескольких процессов разупрочнения металла [Л. 1, 8 и 11].

9. РАБОТА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОСУДОВ

Из рис. 15 видно, что при повреждении все трещины расположились в направлении, близком к направлению продольной оси барабана. Экранные трубы и трубы эко-

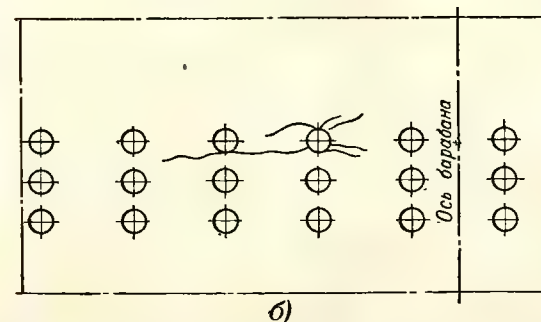
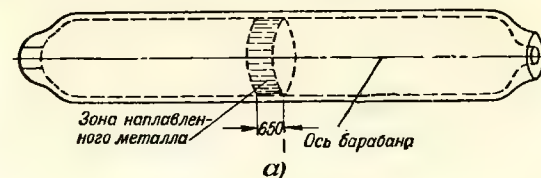


Рис. 15. Трещины на внутренней поверхности ковального барабана, на которую был наплавлен слой металла толщиной 9 мм.

а — расположение зоны наплавленного металла; *б* — вид трещин между трубными отверстиями.

номайзера разрываются также в продольном направлении. Это неслучайно и связано с тем, что в поперечном сечении трубы или барабана действуют вдвое меньшие растягивающие напряжения, чем в продольном сечении.

Сравним, например, силы, действующие в двух сварных швах: продольном и кольцевом (поперечном). На рис. 16 эти швы показаны точечным пунктиром, а силы для наглядности показаны приложенными к наружной поверхности барабана. В обоих случаях внутренний диаметр барабана равен

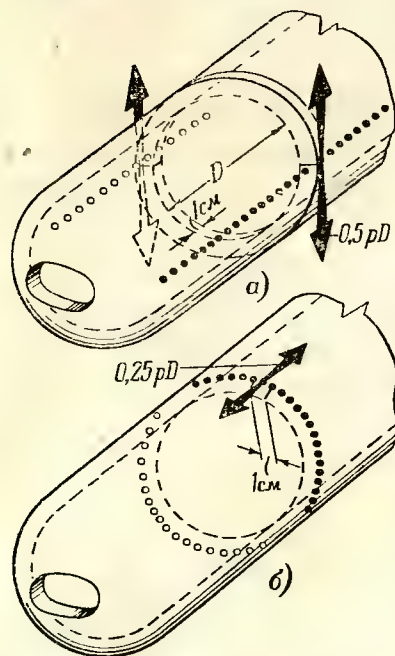


Рис. 16. Схема действия сил, стремящихся разорвать котельный барабан.

а — силы, действующие на 1 см длины продольного сечения барабана и стремящиеся оторвать верхнюю половину от нижней; б — силы, действующие на 1 см длины поперечного сечения барабана.

метр барабана равен D [см], а внутреннее давление p [ат]; при этом на каждый квадратный сантиметр внутренней поверхности барабана действует сила p [кг].

Рассмотрим сначала условия работы продольного шва. Сила, стремящаяся оторвать верхнюю половину барабана от нижней, действует на его внутреннюю цилиндрическую поверхность и численно равна силе, которая возникла бы в случае, если бы верхняя и нижняя половины барабана были плоскими. На каждый сантиметр длины барабана эта сила равна pD [кг]; она стремится разорвать обе стенки барабана (слева и справа на рис. 15, а); следовательно, на 1 см продольного сварного шва действует сила $0,5 pD$ [кг].

Сила, стремящаяся разорвать поперечный шов барабана, численно равна

$$P = p \frac{\pi}{4} D^2.$$

Разделив эту силу на длину окружности πD , найдем усилие, действующее на 1 см поперечного шва (рис. 15, б):

$$P_1 = p \frac{D}{4} = 0,25 pD \text{ [кг]},$$

т. е. сила, действующая на единицу длины поперечного шва, вдвое меньше силы, приложенной к продольному шву. Толщина швов как в поперечном, так и в продольном направлениях одинакова, поэтому средние напряжения в продольном и поперечном швах также различаются в 2 раза. Это соотношение справедливо не только для сварных швов, но и для любых продольных и поперечных сечений сосудов, имеющих цилиндрическую форму.

При расчете элементов парового котла всегда обеспечивается некоторый запас прочности, благодаря чему достигается надежная работа как при наличии в стали различных внутренних пороков, так и в случаях, когда в барабанах и трубах возникают не предусмотренные расчетом дополнительные напряжения. Это происходит,

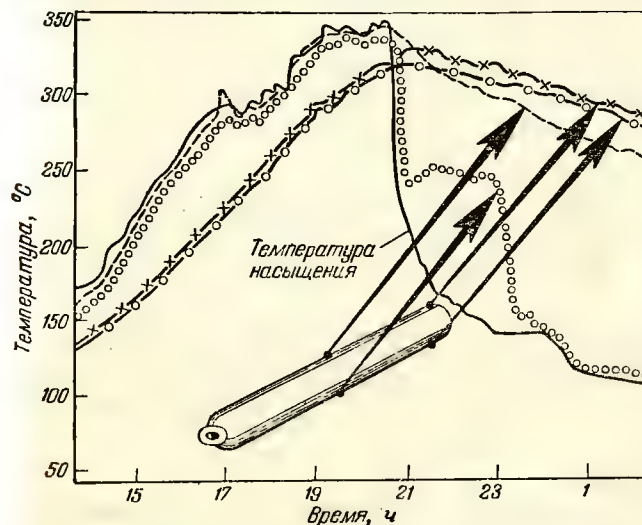


Рис. 17. Изменение температуры на отдельных участках барабана котла ТП-240-1, работающего при давлении 185 ат, во время растопки и при последовавшем непосредственно после нее аварийном разрыве экранной трубы.

например, при зажатии экранных труб во время растопки или после прекращения работы котла, при неравномерном перегреве пара в змеевиках пароперегревателя и т. п.

На рис. 17 показано, насколько неравномерно изменялась температура барабана котла ТП-240-1 во время растопки и при последовавшем непосредственно после этой растопки аварийном разрыве экранной трубы.

В средней части барабана, вблизи места присоединения к нему разорвавшейся трубы, внутренняя поверхность стенок омывалась насыщенным паром, выходящим из барабана в трубу и оттуда — в топочную камеру. Там охлаждение металла происходило гораздо быстрее, чем в остальной части барабана. Разность температур достигала 150°C .

Неравномерное охлаждение сопровождалось изгибом барабана и значительным увеличением напряжений в стенке. Однако благодаря наличию запаса прочности барабан не был поврежден.

10. ВЛИЯНИЕ НА МЕТАЛЛ ЧРЕЗМЕРНОГО НАГРЕВА

Разрушение чрезмерно нагретой стали часто называют «пережогом». По отношению к поверхностям нагрева парового котла такой термин неточен. При высокой температуре происходит не «пережог», т. е. соединение стали с кислородом, а соответствующее изменение ее строения и свойств. Термин «пережог» продолжает употребляться потому, что он весьма наглядно характеризует значительное уменьшение прочностных свойств металла при высокой температуре.

При высокой температуре в перлитной стали могут возникнуть разупрочняющие процессы, связанные с изменением структуры металла. При увеличении с помощью микроскопа в 600—800 раз можно заметить, что происходит постепенный распад перлита. Входящие в его состав твердые пластинки цементита с течением времени распадаются на отдельные частицы, которые затем изменяют плоскую форму на сферическую (рис. 18). В дальнейшем мелкие зерна цементита сливаются в бо-

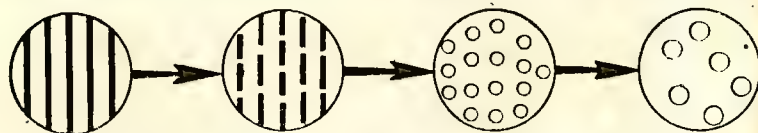


Рис. 18. Схема постепенного превращения пластинчатого перлита в зернистый при нагреве стали до высокой температуры.

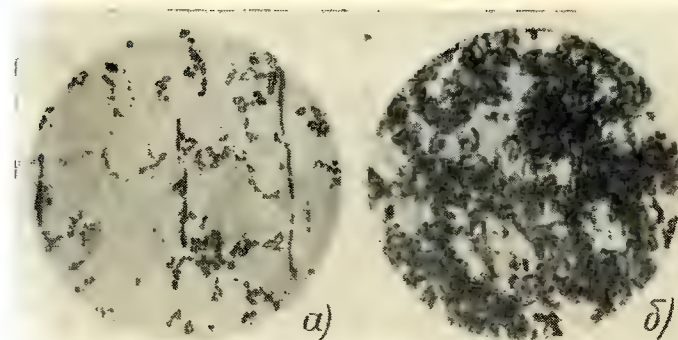


Рис. 19. Структура стали в месте разрыва змеевиков пароперегревателей, поврежденных вследствие чрезмерного нагрева (увеличено в 475 раз).

а — сталь марки 20; б — сталь марки 15ХМА.

лее крупные. Этот процесс называется сфероидизацией цементита. Он происходит тем быстрее, чем выше температура стали.

Под микроскопом сферические зерна цементита имеют вид кружков не вполне правильной формы (рис. 19). Их наличие недопустимо, так как при сфероидизации уменьшается прочность и ускоряется процесс разрушения стали.

Сфероидизация цементита в стали может быть устранена посредством термической обработки, состоящей в нагреве до температуры, при которой произойдет переход всего металла в гамма-структуру, и медленном охлаждении.

Чтобы избежать сфероидизации цементита при нагреве до высокой температуры, в сталь нужно вводить легирующие металлы, которые тормозят этот процесс, и не допускать наличия в стали добавок, ускоряющих распад перлита. В частности, жестко ограничивается содержание в стали алюминия.

На первых электростанциях высокого давления паропроводы изготовляли из стали, содержащей 0,5% молибдена. Лабораторная проверка свойств этой стали показала, что при нагреве примерно до 500°C она имеет высокую прочность. Однако при длительном нагреве до температуры $490\text{—}540^{\circ}\text{C}$ в молибденовой стали возникало постепенное изменение структуры перлита. В настоящее время для длительной работы при высокой температуре применяют

хромомолибденовые и хромомолибденованадиевые стали. Применение же молибденовых сталей типа 16М ограничено областью более низких температур.

Чрезмерный нагрев может вызвать не только сфероидизацию цементита в стали, но и другие изменения ее строения. Иногда наблюдается действительный «пережог» стальных деталей парового котла, т. е. соединение железа с кислородом. Окисление металла происходит медленно, если чрезмерно нагретая сталь омывается дымовыми газами, в которых содержание кислорода невелико. В таких случаях разрушение металла возникает обычно не из-за его окисления, а вследствие потери механической прочности при высокой температуре. Если же чрезмерно нагретая сталь омывается воздухом, то разрушение может произойти по причине превращения металла в окалину (рыхлые окислы железа).

Котел паропроизводительностью 20 т/ч работал при давлении 9 ат на промышленном предприятии. Уголь сжигался на механической цепной колосниковой решетке, по бокам которой были установлены прямоугольные горизонтальные короба (панели), предохранявшие от прогорания кирпичную обмуровку в местах, где слой горящего топлива соприкасался с боковыми стенами топки. Панели охлаждались водой, которая поступала в них самотеком из барабана котла, частично испарялась и выходила по отводящим трубам в другой барабан. Обращенная в топку сторона панелей непрерывно омывалась воздухом, подававшимся под слой горящего угля.

Однажды водоподводящая труба панели была полностью забита шламом, вследствие чего поступление в панель воды прекратилось. Отводящая труба панели нагрелась до высокой температуры и разорвалась. Котел вышел из строя.

При осмотре оказалось, что обращенная в топку стенка панели немного выпучилась. На ее поверхности оказался слой рыхлой чешуйчатой окалины толщиной более 5 мм. Но под окалиной металл не был поврежден и замены панели не потребовалось.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛА

11. ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕЛЬНОТЯНУТЫХ ТРУБ

У современного парового котла все работающие под давлением трубы (как обогреваемые, так и необогреваемые) изготавливаются цельнотянутыми, т. е. без продольного сварного шва. Из таких же цельнотянутых

труб (но значительно большего диаметра) делают цилиндрическую часть сборных камер (коллекторов). Лишь в воздухоподогревателе устанавливают трубы с продольным сварным швом.

Способы изготовления цельнотянутых труб в этой книге рассматриваются в объеме, необходимом при изучении дефектов, которые выявляются во время эксплуатации паровых котлов на электростанциях. Основными операциями при изготовлении труб являются: прошивка заготовки, т. е. изготовление из нее пустотелой стальной гильзы, и получение из этой гильзы тонкостенной трубы.

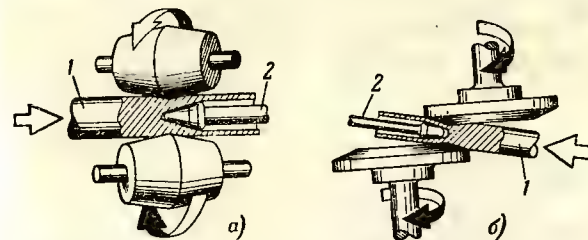


Рис. 20. Схемы прошивки заготовки цельнотянутой трубы.

а — на валковом стане. б — на дисковом стане.

Цилиндрическую заготовку предварительно нагревают в печи до температуры 1100—1250° С. Прошивка производится при движении раскаленной заготовки между вращающимися в одну сторону валками или дисками (рис. 20). При этом заготовка 1 начинает вращаться в обратную сторону. Кроме того, валки или диски сообщают заготовке поступательное движение и обжимают ее, вследствие чего несколько уменьшается ее диаметр и в выходящем из обжатия торце появляется воронкообразное углубление. В это углубление вставляют носик оправки 2, причем для более точной установки торец заготовки предварительно центруется. При дальнейшем движении заготовки оправка (называемая также дорном) врезается в раскаленный металл и осуществляет прошивку.

Вторая операция — раздача трубы до требуемых размеров — производится различными способами. На рис. 21, а схематически показаны валки, между которыми растягивается гильза и уменьшается толщина ее стенки.

На рис. 21,б схематически изображена одна из конструкций пилигримового стана, валки которого при каждом обороте ударяют по гильзе, куют ее и вытягивают. В промежутках между ударами гильза подается немного вперед и одновременно поворачивается.

Трубы малого диаметра часто изготавливают на редуционных станах, валки которых по конструкции

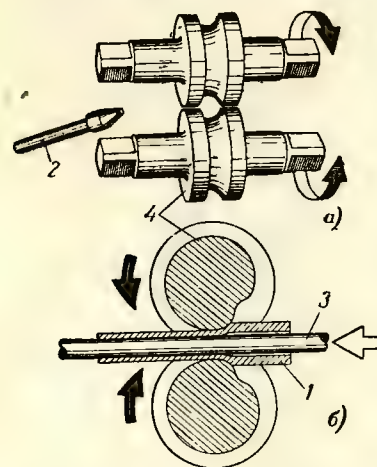


Рис. 21. Схемы прокатки цельнотянутой трубы.

а — на автоматическом стане; б — на пилигримовом стане; 1 — прокатываемая гильза (на схеме а не показана); 2 — неподвижная оправка; 3 — оправка, перемещаемая вместе с трубой; 4 — валки.

близки к валкам, изображенным на рис. 21,а. Уменьшение диаметра происходит при последовательном прохождении трубы через большее число круглых отверстий между различными валками. Оправку в трубу не вставляют, и толщина стенки трубы на редуционном стане не уменьшается.

Дефекты, возникающие при изготовлении цельнотянутых труб, можно разделить на три основные группы:

1. Неметаллические включения остаются в стали вследствие нарушения технологии ее изготовления на металлургическом заводе. Эти включения имеют вид тонкой плены или отдельных близко расположенных зерен.

При небольшом количестве таких включений труба может работать вполне надежно. Если же включений много и они образуют сквозную или почти сквозную плену, то трубу обычно отбраковывают на трубопрокатном или котлостроительном заводе либо при гидравлическом испытании в период монтажа котла на электростанции. Однако отдельные трубы отбраковываются только при эксплуатации котла, когда ослабленный металл не выдерживает длительного напряжения и разрывается. Такие разрывы чаще происходят на гibaх труб, поскольку при операции гiba в холодном состоянии увеличиваются имеющиеся небольшие трещины.

Котел паропроизводительностью 220 т/ч на давление 100 ат, будучи включенным в работу после монтажа, проработал несколько дней, после чего был отключен для осмотра. При этом обнаружилось, что из трех труб ширмового пароперегревателя бьет струя пара. Когда котел несколько остыл, парение заметили уже в шести местах, а еще через 4 ч неплотными оказались трубы 14 ширм. У пароперегревателя рассматриваемого котла ширмы включены по

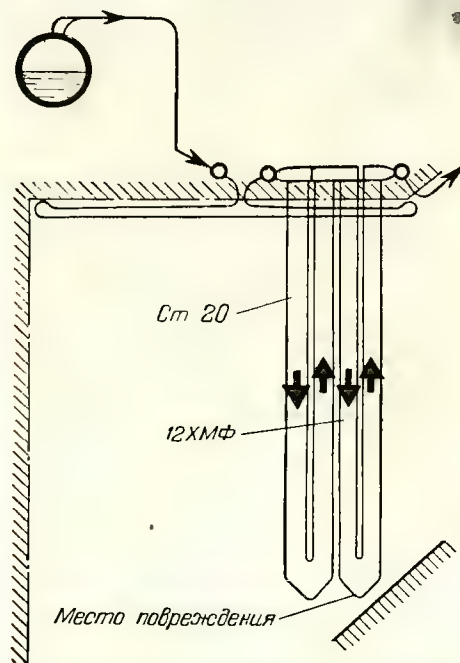


Рис. 22. Схема расположения пакетов труб ширмового пароперегревателя у котла ТКЗ паропроизводительностью 220 т/ч на давление 100 ат.

две последовательно; трещины были расположены во вторых по ходу пара трубных пакетах, в нижних гibaх труб (рис. 22).

Трубы этих пакетов были изготовлены в соответствии с проектом из легированной стали марки 12ХМФ, в которой имелось большое количество посторонних включений, имевших вид отдельных зерен (рис. 23). Однако хотя эти включения и уменьшили прочность стали, их наличие не было единственной причиной повреждения труб.

Трубы из жаропрочной стали после изготовления подвергают термической обработке, в процессе которой их нагревают до температуры, когда происходит перестройка кристаллической решетки

М. В. Мейкляр.



Рис. 23. Трещина на гйбе ширмового пароперегревателя.

а—внешний вид трещины на гйбе трубы диаметром 42X4,5 мм, изготовленной из стали марки 12ХМФ; б—вид трещины, проходящей через посторонние включения в металле при увеличении в 200 раз.

металла в гамма-структуру, и затем медленно охлаждают. В рассматриваемом случае при термической обработке трубы были недогреты и при охлаждении металл приобрел неравномерное строение, характеризующееся неодинаковыми размерами отдельных зерен и наличием очень крупных зерен феррита (рис. 24). Это также уменьшило прочность стали.

Все же сквозных трещин не было ни при изготовлении ширм, ни при их работе под нагрузкой. Но после отключения котла происходит конденсация оставшегося в пароперегревателе пара. Образующаяся при этом вода стекает в нижние гйбы труб и быстро охлаждается. Над слоем воды стенки труб имеют температуру, близкую к температуре насыщенного пара. Неравномерное охлаждение вызывает дополнительное напряжение в металле, которое и привело к разрыву ослабленных стенок труб ширмового пароперегревателя.

2. Разностенность (неодинаковая толщина стенки по окружности) труб чаще всего вызывается неравномерным по сечению нагревом заготовки или неравномерным ее остыванием перед прошивкой. Проходя между вальками, заготовка растягивается сильнее с более нагретой стороны, по которой у гильзы получается меньшая тол-

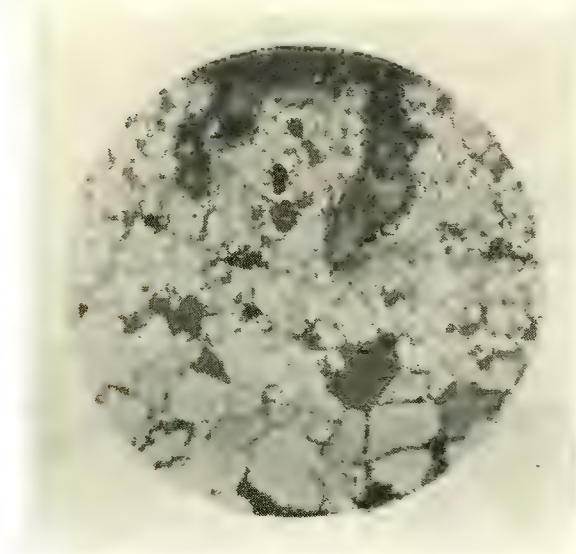


Рис. 24. Наличие в стали марки 12ХМФ зерен феррита различной величины вследствие недостаточного нагрева при термической обработке (увеличено в 200 раз).

щина стенки. Вследствие вращения заготовки при прошивке разностенность получается винтовой (рис. 25).

Разность температур в сечении обычно одинакова по всей длине заготовки, поэтому разностенность, как правило, не изменяется по длине трубы.

Иногда разностенность возникает по причине износа трубопрокатного оборудования или неправильной его настройки. Но и в этих случаях она практически получается одинаковой по длине трубы. Отсутствие разностенности всегда проверяют только по торцам труб.

При анализе различных повреждений трубной системы котла иногда возникало предположение о том, что

их причиной явилась разностенность труб только в их средней части по длине. Однако проверка обычно показывала, что обнаруженная местная разностенность возникала не при изготовлении труб, а при эксплуатации котла на электростанции. Такую разностенность, связанную с односторонним чрезмерным нагреванием металла, легко можно отличить по увеличению периметра деформированных труб.

3. Трещины и плены возникают как на наружной, так и на внутренней поверхностях труб, а иногда и в толще металла. Трубы с наружными трещинами почти всегда отбраковывают до пуска котла в работу, поэтому условия образования таких трещин ниже не рассматриваются. На внутренней поверхности труб трещины могут быть вызваны не только посторонними включениями в металле, но



Рис. 25. Винтовая разностенность трубы.

и многими другими причинами: износом валков или вставляемой в трубу оправки, недогревом или чрезмерным нагревом металла при его прошивке или прокатке, чрезмерным обжатием заготовки между валками либо другими нарушениями технологического процесса изготовления труб. Для работников электростанций обычно вопрос о том, какое именно нарушение технологии повлекло за собой образование трещин в том или ином случае, является второстепенным. Для них гораздо важнее другой вопрос — как отличить трещины, возникшие при изготовлении труб, от других повреждений поверхностей нагрева, и можно ли после замены участков труб с такими трещинами допустить котел к дальнейшей эксплуатации.

На такие вопросы нельзя, конечно, дать один исчерпывающий ответ, охватывающий все многообразные практические случаи. Поэтому в каждом отдельном случае необходимо тщательно анализировать условия, при которых произошло то или другое повреждение, и определять действительные причины, вызвавшие это повреждение. В результате этого можно выработать практические мероприятия для предупреждения аналогичных повреждений в будущем. В связи с этим полезно привести несколько конкретных примеров.

а) На рис. 26,а показана схема образования трещин при неправильной прошивке заготовки, а на рис. 26,б — структура металла с одной из этих трещин при увеличении в 90 раз. При рассмотрении структуры можно заметить, что вблизи трещины металл несколько светлее, чем вдали от нее. Объясняется это тем, что нагрев стали до высокой температуры сопровождается постепенным обезуглероживанием ее поверхностного слоя, из которого углерод выходит (диффундирует) наружу. В результате этого перлит исче-

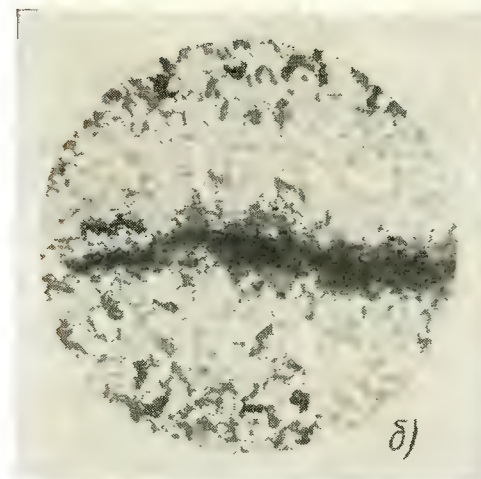
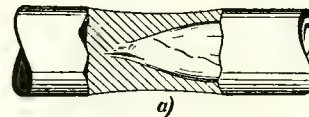


Рис. 26. Образование трещин при неправильной прошивке заготовки труб.

зает и в поверхностном слое остается только феррит, что обнаруживается под микроскопом в виде более светлой окраски протравленной поверхности металла. Одновременно с этим происходит постепенное проникновение (диффузия) кислорода внутрь металла, вследствие чего в поверхностном слое появляются окислы железа.

Обезуглероживание поверхностного слоя стали марки 20 возможно при ее длительном нагреве до температуры 600—700°С или кратковременном нагреве примерно до 1000°С. Нагрев до такой температуры не возможен на котлостроительном заводе, где трубы из углеродистой стали не подвергаются термической обработке. Трубы экономайзера не испытывают такого нагрева и при эксплуа-

тации котла. Следовательно, если в трубах экономайзера вокруг обнаруженных трещин имеется слой обезуглероженного металла, можно утверждать, что трещины возникли не при эксплуатации котла, а при изготовлении труб на трубопрокатном заводе.

б) В котле, работавшем при давлении 64 ат, произошел разрыв необогреваемой трубы, по которой вода из барабана направлялась к выносному сепарационному циклону. Эта труба находилась в эксплуатации около 4 лет.

Уже при первом наружном осмотре обратили внимание на то, что при наружном диаметре 83 мм труба разорвалась на длине 640 мм. Разрыв на столь большой длине свидетельствовал о значительном понижении прочности металла. Анализ показал, что труба была изготовлена из углеродистой стали марки 10, имеющей более высокую пластичность, чем сталь марки 20. Разрыв произошел на гibe трубы. На внутренней поверхности стенок при небольшом увеличении были обнаружены глубокие раковины и борозды, направленные по длине трубы. Отдельные трещины имели глубину более 1 мм.

На кромке разрыва при увеличении были ясно видны две различные зоны: пористая — с внутренней стороны трубы и гладкая — с наружной стороны. Глубина пористой зоны превышала половину толщины стенки. Внутри отдельных трещин находился твердый осадок фосфатов, всегда имеющихся в котловой воде. Во многих местах на внутренней поверхности был слой продуктов коррозии толщиной до 0,3 мм.

Эти борозды и трещины не могли возникнуть при работе необогреваемой трубы под нагрузкой. Они могли появиться только при нарушении технологии изготовления трубы на трубопрокатном заводе. Мелкие трещинки увеличились во время гибки трубы, в дальнейшем они стали очагами коррозионного разрушения металла.

Нарушение технологического процесса изготовления трубы носило, по-видимому, случайный характер, ибо в дальнейшем в течение нескольких лет аналогичных повреждений металла на этих котлах не было.

в) В период окончания монтажа котла ТП-150-1, рассчитанного на давление 32 ат, при проверке трубной системы шар диаметром 25 мм не прошел через 15 змеевиков пароперегревателя внутренним диаметром 31 мм. Два из этих змеевиков разрезали. В них обнаружили винтовую плену, вызвавшую отслоение внутреннего слоя металла толщиной до 1 мм от стенки трубы. Было решено трубы с пленой не заменять. При эксплуатации котла наличие пленки вызвало разрушение только двух труб.

Этот случай показывает возможность длительной надежной работы труб, имеющих неглубокую внутреннюю плену, при отсутствии разрушающего действия коррозии.

12. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА НА ИХ ПРОЧНОСТЬ

Гибка труб. На котлостроительных заводах гибка труб, предназначенных для поверхностей нагрева, как правило, производится в холодном состоянии. Схема

трубогибочного станка и процесс гибки труб показаны на рис. 27. С помощью зажима 1 трубу прикрепляют к сектору 2, который затем медленно поворачивают на необходимый угол (на схеме — против часовой стрелки). При этом труба скользит по направляющей 4, а ее прикрепленная к сектору часть поворачивается вместе с ним, благодаря чему труба прижимается к сектору и принимает его профиль. Таким образом, изгиб трубы происходит в том месте, где она соприкасается с сектором. В этом месте внутри трубы должна находиться неподвижная оправка (дорн) 3, которая препятствует образованию овального сечения при гibe.

На рис. 27,а изображена одна из наиболее простых конструкций трубогибочного станка. Для ясности здесь труба не показана, а зажим 1 дан в таком положении, в каком он оказывается после гiba трубы, а направляющая 4 с дорном 3 показаны отодвинутыми в сторону.

При гibe происходят растяжение металла в наружной части изгибаемой трубы и сжатие металла в ее внутренней части. Чем меньше радиус гiba, тем больше деформации. Как правило, происходящая при гibe деформация не достигает опасного значения и согнутые трубы работают вполне надежно.

Для правильной гибки труб необходимо, чтобы при повороте сектора 2 дорн 1 находился точно в том месте, где происходит деформация металла (рис. 28,а). При смещении дорна от правильного положения назад (рис. 28,б) труба принимает при гibe овальное сечение. Еще более опасно смещение дорна вперед (рис. 28,в), при котором дорн соприкасается с внутренней поверхностью трубы, немного поворачивается, царапает и сми-

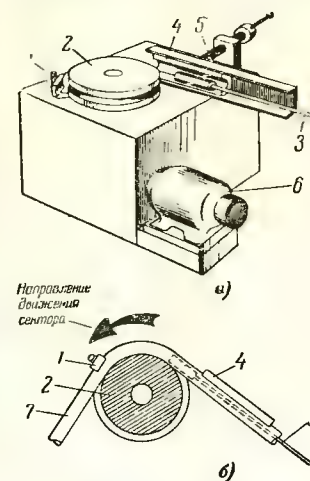


Рис. 27. Схема трубогибочного станка и процесс гибки труб.

а — вид сбоку; б — схема действия: 1 — зажим; 2 — поворотный сектор; 3 — оправка (дорн); 4 — направляющая поверхность; 5 — регулирующий винт; 6 — электродвигатель; 7 — изгибаемая труба.

нает металл в том месте, где при гибке возникают большие напряжения. Иногда деформация оказывается настолько большой, что в местегиба после непродолжительной работы под нагрузкой в трубе появляются по-

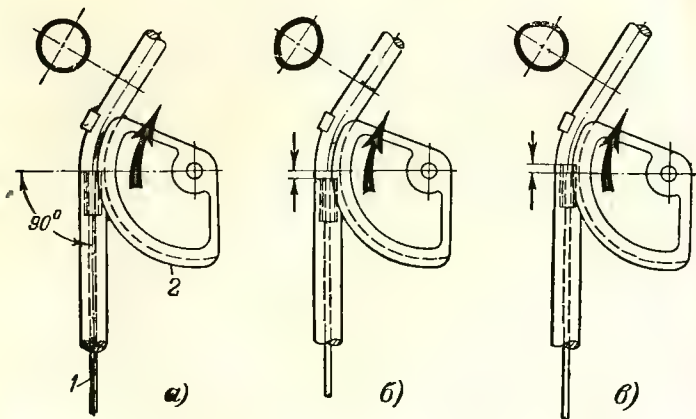


Рис. 28. Влияние положения дорна на операцию гибки трубы.

перечные трещины. При возникновении поперечных трещин в изогнутом участке трубы рекомендуется проверить наличие на внутренней поверхности металла вмятин от дорна.

После эксплуатации в течение 7 лет у котла ТП-230 произошел разрыв одного из змеевиков пароперегревателя на последнем (по ходу пара) гйбе трубы. Место разрыва с тупыми кромками находилось на внешней стороне гйба трубы (рис. 29). После того как труба была разрезана, выявилась большая разностенность: в месте разрыва толщина стенки трубы составляла 3 мм, а с противоположной стороны — 6,5 мм (при расчетной толщине стенки 5,0 мм).

При гибке всегда возникает разностенность трубы, причем разностенность тем больше, чем меньше отношение радиуса гйба к диаметру трубы. Однако, по данным практики, при наружном диаметре 42 мм наибольшее изменение толщины стенки трубы не должно превышать 1 мм. Отдельные отступления от правильной технологии (например, смещение дорна вперед) могут привести к дополнительному уменьшению толщины стенки трубы в наружной части гйба.

В описанном случае на прямом участке трубы обнаружили небольшую винтовую разностенность. При гибке сторона с меньшей толщиной стенки случайно оказалась снаружи, что вызвало дополнительное уменьшение толщины металла.

Стыковая сварка труб производится на котлостроительном заводе контактными электросварочными машинами. Тщательно очищенные концы обеих стыкуемых труб зажимаются губками 3 (рис. 30,а) машины, которые сближаются до соприкосновения торцов труб. Под действием пропускаемого через стык электрического тока кромки металла нагреваются до высокой температуры и поверхность торцов труб покрывается тонким слоем расплавленного металла. При этом часть метал-

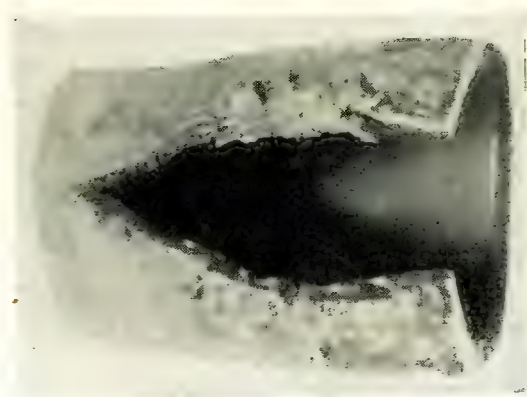


Рис. 29. Разрыв трубы пароперегревателя, изготовленной из стали марки 15ХМ.

ла испаряется, что сопровождается усиленным искрением. Затем стыкуемые трубы резко прижимают друг к другу (осаживают), в результате чего происходит утолщение металла в стыке. Кроме того, как снаружи, так и внутри сварного шва образуются наплывы металла труб (грат). Последующие операции заключаются в продувке труб, а иногда в пропускании сквозь них шара или «снаряда» 1 (рис. 30,б), очищающего их внутреннюю поверхность.

С наружной поверхности сварного стыка еще не застывший грат снимают особыми клещами с режущими кромками, которые проворачивают вручную вокруг стыка. Внутри стыкуемых концов труб вставляют картонные кольца 4 (рис. 31,а), на которые падает большая

часть брызг металла, вылетающих при сварке внутри труб.

Внедрение описанной схемы автоматической стыковой сварки труб было сопряжено с большими затруднениями. Первые советские паровые котлы высокого давления, введенные в строй в 1948—1950 гг., приходилось по несколько раз выключать из работы, вследствие того,

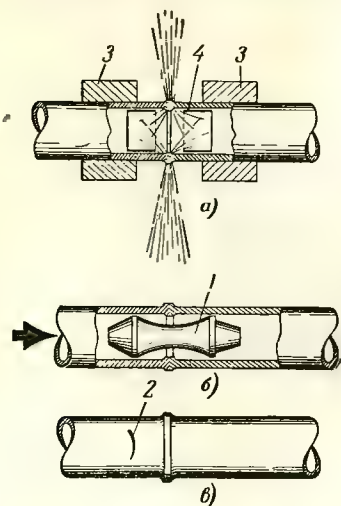


Рис. 30. Схема автоматической стыковой сварки труб.

а — оплавливание торцов стыкуемых труб; б — прохождение «снаряда» 1 в трубу; в — трещина 2 при неплотном прижатии зажимных губок 3 к трубе; 4 — картонная кольцевая прокладка.

Это объясняется тем, что в стыках труб после сварки изредка остаются сквозные микроскопические трещины, которые нельзя обнаружить при гидравлическом испытании. Такие трещины возникают, например, при разъедании имеющихся в сварном шве неметаллических включений. При высоких давлениях и температуре эти трещины могут стать очагами коррозионного разрушения металла. Подобная коррозия отсутствует в змеевиках пароперегревателя, а также в экономайзерах котлов среднего давления. Расположение сквозных трещин преимущественно в средней и верхней частях экономайзера

что в первые месяцы их эксплуатации часто возникали неплотности в сварных швах змеевиков экономайзера. Попадая на соседние трубы, струя воды быстро разрушала металл, после чего эти трубы также оказывались неплотными.

Такие повреждения сварных стыков у труб происходили только в экономайзерах. Первая (по ходу пара) часть пароперегревателя этих котлов изготовлялась из таких же труб, стыковая сварка змеевиков производилась теми же методами и на тех же машинах, однако в пароперегревателе неплотность сварных стыков у труб была редким исключением. Таких дефектов не наблюдалось и у котлов среднего давления.

объясняется тем, что при высокой температуре воды коррозия металла протекает более интенсивно.

Борьба с образованием свищей в сварных стыках велась в основном по линии совершенствования процесса стыковой сварки труб. Были введены жесткие требования к качеству очистки концов труб перед сваркой, не допускался перекос в сварных швах и т. д. Весьма полезной оказалась внедренная в 1957 г. продувка труб кислородом непосредственно после сварки. Как упоминалось выше, стыкуемые трубы резким усилием прижимают друг к другу, и еще не застывший металл выдавливается наружу, а также внутрь сварного шва. При этом вместе с металлом выдавливаются имеющиеся в шве неметаллические включения.

Раньше обработка кольцевого выступа внутри шва ограничивалась пропусканием шара или «снаряда». Теперь при продувке кислородом этот еще не застывший кольцевой выступ металла почти полностью выгорает. Вместе с ним выгорают и неметаллические включения, благодаря чему значительно уменьшается опасность образования в трубах экономайзера опасных трещин. «Снаряд» теперь прогоняют только тогда, когда продувка кислородом не производится (например, при сварке труб пароперегревателей, изготовленных из аустенитной стали).

Иногда в зоне сварных стыков возникали и другие повреждения. Сквозные трещины 2 появлялись на расстоянии 20—30 мм от шва (рис. 30, в). Они были вызваны износом губок сварочной машины и неплотным прилеганием края губки к стыкуемой трубе. В зоне плохого контакта электрический ток перегревал металл, вследствие чего появлялись трещины. Поэтому состояние зажимных губок сварочных машин следует периодически проверять.

Часть сварочных работ выполняется вручную при монтаже парового котла на электростанции. Эта сварка производится главным образом в местах присоединения труб к сборным камерам, т. е. на необогреваемых участках. Большинство неплотностей в этих сварных стыках также объясняется наличием в них неметаллических включений. Дефекты в таких сварных стыках выявляются в течение более длительного времени, нежели возникновение наплавленного металла в основной — проис-

у стыков, подверженных обогреву дымовыми газами. Отдельные свищи возникают после 2—3 лет работы котла.

Борьба с образованием свищей также ведется по линии жесткого соблюдения технологии производства сварочных работ: тщательной очисткой концов труб от ржавчины, грязи и масла, применением качественных электродов с неповрежденной обмазкой и т. д.

13. ДУГОВАЯ ЭЛЕКТРОСВАРКА ДЕТАЛЕЙ КОТЛА

Кроме рассмотренной выше контактной сварки, существуют другие способы соединения деталей котла. При весьма распространенной электрической дуговой сварке под действием электрического тока расплавляется конец подаваемого к месту сварки стального прута (электрода). При этом образуется ванна жидкой стали. Специальные вещества, называемые флюсами, расплавляясь, покрывают поверхность металла и препятствуют его соединению с кислородом воздуха. Флюсы растворяют в себе окислы железа, образуя вместе с ними легкотекучую массу, легко всплывающую на поверхность жидкого металла.

При сварке вручную флюс обычно имеет вид обмазки, покрывающей электрод снаружи; эта обмазка расплавляется вместе с электродом. При автоматической дуговой сварке барабана на котлостроительном заводе измельченный флюс непрерывно сыплет на наплавляемый металл.

Охлаждение сварного шва в основном происходит за счет поглощения тепла самим стальным изделием. Шов охлаждается настолько быстро, что как наплавленный металл, так и прилегающая к нему зона имеют структуру, которая даже по внешнему виду весьма далека от структуры основного металла (рис. 31). Наплавленный металл сварного шва, как правило, имеет иную твердость, чем основной металл.

При быстром охлаждении в сварном шве возникают внутренние напряжения, величина которых возрастает с увеличением толщины металла. Снятие этих напряжений и некоторое улучшение структуры шва осуществляют термической обработкой деталей. Для этого барабаны и камеры котла после сварочных работ помещают в печь, нагревают до высокой температуры и после некоторой выдержки охлаждают на воздухе.

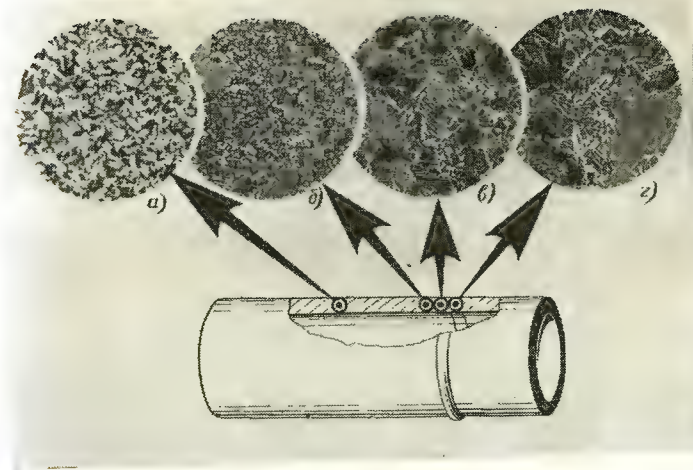


Рис. 31. Структура металла у контактного сварного шва трубы диаметром $38 \times 4,5$ мм, изготовленной из стали марки 20 (увеличено в 50 раз.)

а — структура основного металла; б — структура так называемой зоны термического влияния; в — структура на границе зоны плавления; г — структура центральной части контактного сварного шва.

Дефекты сварных швов могут быть вызваны различными причинами:

1. Они могут быть вызваны неправильным положением сопрягаемых деталей: перекосом, увеличением или уменьшением расстояния между ними и т. п. (рис. 32).
2. Непровар — отсутствие соединения между основным и наплавленным металлом или недостаточное про-

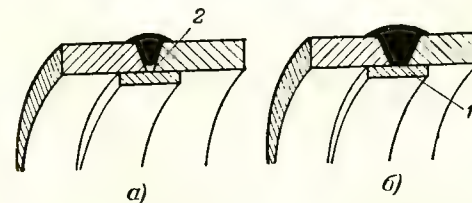


Рис. 32. Неправильная (а) и правильная (б) формы сварного шва при стыковой сварке труб большого диаметра.

1 — подкладное кольцо; 2 — зона непровара.

ходит при загрязнении свариваемых поверхностей, недостаточной силе тока, слишком большой скорости автоматической сварки и других отклонениях от правильной технологии сварочных работ.

3. Нарушение технологии может вызвать быстрый обрыв электрической дуги, что влечет за собой образование углубления в шве (кратера); различные загрязнения вызывают пористость шва, иногда возникает окисление металла и т. п. Показанные на рис. 33 трещины по-

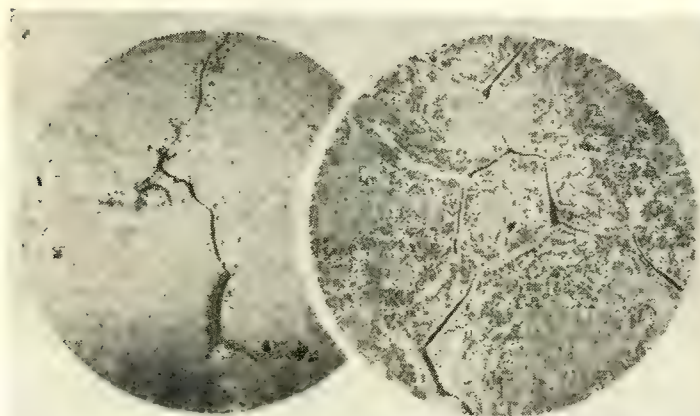


Рис. 33. Трещины, возникшие при газовой сварке на расстоянии 1,5—3 мм от наплавленного металла (увеличено в 85 раз).

явились после термической обработки детали и объясняются тем, что стенки сварного шва были нагреты до очень высокой температуры. Произошло поглощение металлом кислорода из воздуха, и в стали образовались тонкие пленки закиси железа, по которым и возникло растрескивание.

4. Чрезмерный подвод тепла к месту сварки приводит к расширению зоны плавления основного металла. Когда слишком широкая ванна жидкой стали охлаждается, в изделии возникают большие дополнительные напряжения и по сторонам сварного шва могут появиться трещины.

14. ПОВРЕЖДЕНИЯ ЭКРАННЫХ ТРУБ ВСЛЕДСТВИЕ НАРУШЕНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОДЫ

На рис. 34 схематически показано, что в экране парового котла парообразование происходит только в обогреваемых трубах 4, находящихся в топке, а в наружных необогреваемых трубах 2 находится вода. Поэтому внутреннюю часть соединенных между собой труб экрана можно уподобить сообщающимся сосудам, причем в левых сосудах находится вода, а в правых — смесь воды и пара. В обогреваемых трубах более легкая пароводяная смесь движется вверх, а на ее место по наружным необогреваемым трубам поступает вода, которая в обогреваемых трубах частично испаряется и также перемещается наверх, в барабан котла.

Парообразование в экранных трубах происходит непрерывно, так же непрерывно осуществляется и круговое движение воды (ее циркуляция). Почти всегда это движение воды происходит правильно, обеспечивая надлежащее охлаждение металлических стенок экранных труб; но иногда циркуляция воды нарушается, и это может вызвать повреждение труб вследствие чрезмерного нагрева металла.

Большинство таких повреждений происходит при образовании больших пузырей пара («паровых пробок»), закрывающих собой все внутреннее сечение отдельных экранных труб. Неподвижный или медленно движущийся пар очень плохо проводит тепло, поэтому в местах образования таких «пробок» металл стенок труб быстро нагревается до очень высокой температуры. При нагреве до высокой температуры прочность металла значительно уменьшается, труба не выдерживает внутреннего давления, раздувается и разрывается, в результате чего котел приходится немедленно выключать из работы.

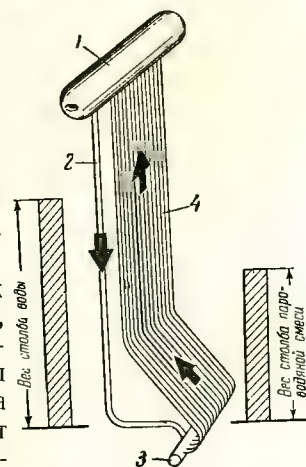


Рис. 34. Упрощенная схема циркуляции воды в экране парового котла.
1—барабан; 2—опускная необогреваемая труба; 3—нижний экранный коллектор; 4—обогреваемые трубы.

В момент разрыва экранной трубы пароводяная смесь выбрасывается из образовавшегося отверстия с очень большой скоростью, и металл резко охлаждается. Нагрев и быстрое охлаждение вызывают изменение структуры стали, ее твердость значительно увеличивается.

Внешний вид места разрыва трубы может быть различным. Если в металле нет скрытых пороков, отверстие



Рис. 35. Характер деформации экранных труб, разорвавшихся из-за нарушения циркуляции воды.

а — обычный вид места разрыва экранной трубы; *б* — разрыв экранной трубы через четверть часа после кратковременного упуска воды; *в* — разрыв экранной трубы по месту внутренней трещины в металле.

имеет характерную удлиненную форму (рис. 35, *а*), причем периметр трубы в зоне разрыва увеличен, а кромки металла острые. При наличии в трубе скрытых трещин отверстие имеет участок, по форме близкий к прямоугольному (рис. 35, *в*); периметр трубы может быть увеличен меньше, чем у соседних деформированных, но не разорвавшихся труб. Вокруг отверстия металл обычно имеет меньшую толщину, но его кромки могут и не быть

острыми. Такой характер раскрытия поврежденной трубы обычно не означает, что причиной ее разрыва явились скрытые дефекты металла. Но при одновременной деформации нескольких труб такая труба обычно разрывается раньше других.

Нарушение циркуляции может произойти по различным причинам. Чаще всего оно имеет место при упуске воды, т. е. при чрезмерном снижении уровня воды в барабане котла. Иногда циркуляция воды нарушается в результате очень большой неравномерности обогрева отдельных экранных труб. Тогда в менее обогреваемых трубах вода движется вниз, а пар поднимается вверх, идя против потока воды. При этом отдельные пузыри пара в течение некоторого промежутка времени остаются неподвижными или почти неподвижными, вследствие чего образуются указанные выше «паровые пробки».

Приведем следующий пример разрыва экранных труб, вызванного нарушением циркуляции воды.

В период первичного ввода в эксплуатацию котла ТП-170-1 паропроизводительностью 170 т/ч при 100 ат стремились по возможности сократить длительность пусковых работ. Котел, как обычно, был подвергнут щелочению, т. е. длительному кипячению в нем воды, в которую были добавлены щелочи. Затем его нужно было охладить и промыть. Вместо этого для экономии времени произвели лишь трехкратную длительную продувку всех нижних экранных камер. При подъеме нагрузки котла до 35 т/ч произошел разрыв экранной трубы.

Как известно, у котлов высокого давления экраны состоят из большого числа отдельных секций труб с независимой циркуляцией. У котла ТП-170-1 каждый из экранов был разделен на три секции. Осмотр показал, что из 29 труб левой секции заднего экрана у 17 труб диаметр был увеличен с 76 до 78—82 мм, а одна из труб была разорвана по скрытой трещине (см. рис. 35, *в*).

Было установлено, что руководившие пуском котла монтажники не удовлетворились тремя продувками всех экранов после щелочения и «для верности» решили продуть их четвертый раз при указанной выше нагрузке. Эта продувка и явилась причиной повреждения экранных труб.

При периодической продувке происходит ослабление циркуляции воды, незначительное при полной нагрузке котла и безвредное в период растопки при низких температурах в топочной камере. Но открытие продувочных вентилей очень опасно, если котел работает с малой нагрузкой, при которой циркуляция воды ослаблена.

В данном случае при относительно длительном нарушении циркуляции деформировалось большое число экранных труб. Первой разорвалась труба, имевшая скрытую внутреннюю трещину.

15. ПОВРЕЖДЕНИЯ ЭКРАННЫХ ТРУБ ПРИ НАЛИЧИИ В НИХ НАКИПИ

При обычных условиях эксплуатации котлы среднего и высокого давлений должны работать без отложения накипи неограниченно длительное время. Выпадение накипи у таких котлов обычно вызывается какими-либо нарушениями правильного водного режима. В экранных трубах накипь отлагается на стороне, обращенной к топке, и преимущественно в зоне наиболее сильного обогрева, т. е. в зоне, где расположено ядро факела.

Слой накипи препятствует передаче тепла от металла к воде и способствует повышению температуры металла. У котлов высокого давления опасным может быть слой накипи толщиной даже в доли миллиметра.

Так как накипь не всегда откладывается равномерно, то повреждение труб иногда имеет характер большого числа отдельных выпучин (отдулин). При высоком нагреве может произойти также изменение структуры металла (рис. 36).

При наличии накипи первыми обычно выходят из строя трубы, имеющие скрытые дефекты в металле. Если накипь своевременно не удаляется и толщина ее слоя продолжает расти, повреждаются и трубы, изготовленные из качественного металла.

У серийного котла высокого давления ТП-230-2, отапливаемого антрацитом, после годичной эксплуатации появились сквозные продольные трещины на шести экранных трубах, относившихся к соленым отсекам ступенчатого испарения. Все повреждения были почти на одной и той же высоте (на 1—1,5 м выше зажигательного пояса), в зоне максимального обогрева. Химический анализ металла и его механические испытания показали удовлетворительные результаты. Характер повреждения был одинаковым у всех труб, все трещины появились на гйбах и были обращены в сторону топки (рис. 37, а); рядом со сквозными имелись небольшие несквозные продольные трещины. Странная, на первый взгляд, особенность заключалась в том, что у двух труб трещины возникли на небольших отдулинах, а у четырех других труб отдулин не было и образование трещин не сопровождалось увеличением диаметра труб. Вне зоны гйба не было обнаружено ни отдулин, ни трещин, ни увеличения диаметра труб.

Вблизи трещин металл имел примерно на 20% меньшую твердость, чем на противоположной стороне труб. На внутренней поверхности поврежденных труб имелся слой рыжеватых, сравнительно неплотных отложений толщиной, измеряемой долями миллиметра. Анализ этих отложений дал возможность установить, что в трубах была фосфатная накипь, вызванная чрезмерным содержанием фосфатов в котловой воде. По мере роста изолирующего слоя

накипи происходило постепенное увеличение температуры металла. Нетрудно установить, до какой температуры были нагреты стенки труб в зоне повреждения. Расчетное напряжение металла равнялось $6,8 \text{ кг/мм}^2$, что примерно соответствует пределу текучести стали марки 20 при температуре 500°C . У четырех труб из шести сквозные трещины возникли без отдулин, т. е. при напряжении, меньшем предела текучести, а у двух труб предел текучести был превзойден.

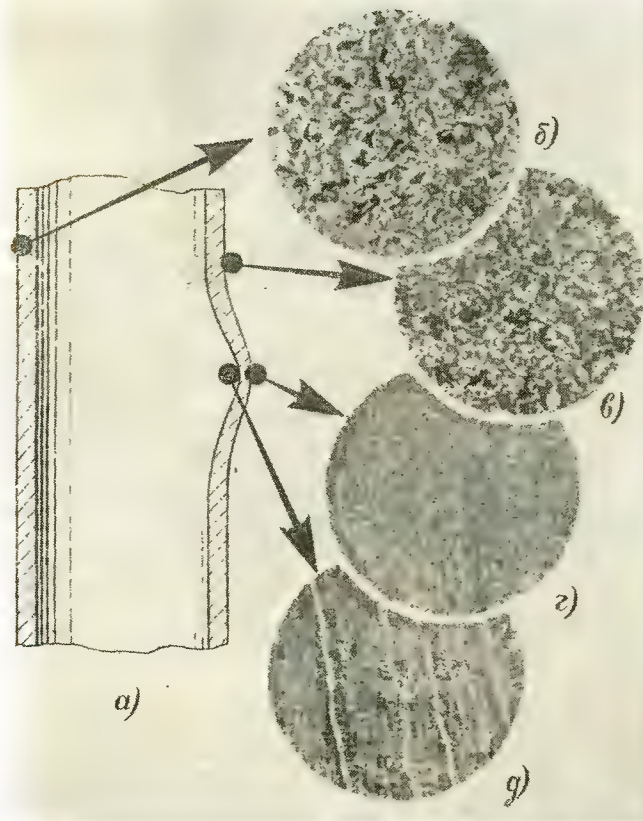


Рис. 36. Изменение структуры стали марки 20 в зоне отдушины на экранной трубе диаметром $60 \times 5 \text{ мм}$, работавшей при давлении 110 ат .

а — схема деформированного участка трубы; б — исходная структура металла; в — структура на границе отдушины; г и д — структура наружной и внутренней поверхностей металла в наиболее утоненной части отдушины (увеличено в 75 раз).

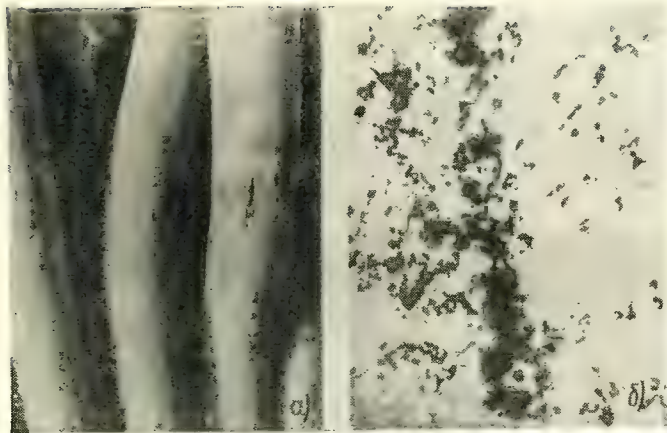


Рис. 37. Трещины на гйбах экранных труб, возникшие из-за отложения накипи в местах, в которых имелись посторонние включения в металле.

а — вид поврежденной трубы; б — посторонние включения при увеличении в 50 раз.

Следовательно, трубы были нагреты лишь до температуры, близкой к 500°C .

Причина разрыва труб была установлена при исследовании поврежденных участков под микроскопом. Феррито-перлитная структура металла была удовлетворительной, однако в стали оказалось большое количество неметаллических включений (рис. 37, б), значительно понижавших ее прочность. При отсутствии накипи запас прочности, по-видимому, был достаточным для надежной работы металла, но при нагреве до 500°C запас прочности уменьшился и несколько труб разорвалось в местах, где металл был более всего ослаблен.

Повреждения труб прекратились после наладки водного режима котла и уменьшения содержания фосфатов в соленых отсеках ступенчатого испарения.

16. ПОВРЕЖДЕНИЯ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ

Змеевики пароперегревателя омываются изнутри паром, который хуже, чем вода, отводит тепло от металла и который нагрет до более высокой температуры по сравнению с водой и пароводяной смесью, омывающей другие поверхности нагрева. Поэтому в нормальных условиях работы наиболее высокий нагрев металла происходит в пароперегревателе котла. Наибольшее количество повреждений возникает в последней по ходу пара части пароперегревателя, т. е. там, где как пар, так и

трубы нагреты до наиболее высокой температуры. Эти повреждения могут быть вызваны различными причинами, из которых рассмотрим лишь следующие:

1. Наибольшее количество повреждений возникает по причине того, что пар в одних трубах нагревается значительно больше, чем в других. Средняя температура выходящего из котла перегретого пара может быть вполне удовлетворительной, но в нескольких трубах температура может иметь недопустимо высокое значение (рис. 38).

Чрезмерное повышение температуры стенок труб приводит к уменьшению прочности стали и увеличению скорости ползучести. Кроме того, чрезмерный нагрев стали может повлечь за собой изменение структуры; например в перлитной стали возникает описанная в гл. 2 сфероидизация цементита.

2. В еще более сложных условиях работают трубы пароперегревателя, изготовленные из аустенитной стали.

Коэффициент линейного расширения этой стали на десятки процентов больше, чем у перлитной стали, а коэффициент ее теплопроводности примерно вдвое меньше. Вследствие этого в трубах, изготовленных из аустенитной стали, при быстром изменении температуры возникает гораздо большая разница между расширением или сжатием наружной и внутренней поверхности, появляются более высокие напряжения в металле и легче могут образоваться трещины.

Приведем следующий пример.

Поливание пластины из аустенитной стали попеременно горячей и холодной водой приводило ее к полному разрушению уже после 100 теплосмен, в то время как обычная углеродистая или хромомолибденовая сталь свободно выдерживает гораздо большее число таких же быстрых изменений температуры.

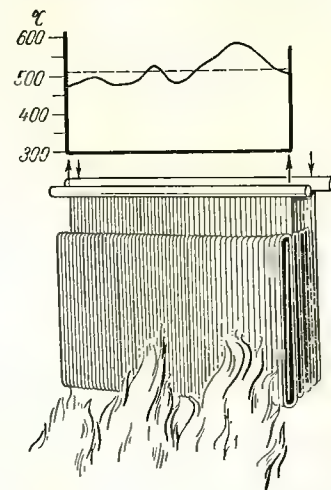


Рис. 38. Различный перегрев пара в змеевиках пароперегревателя при неравномерном горении топлива в топке.

При наличии деталей, изготовленных из аустенитной стали, нужно значительно медленнее производить растопку котла, а также прогрев паропроводов и турбин. Более медленным должно быть и остывание котла после прекращения работы. Особо опасна перепитка котла водой, при которой температура перегретого пара резко снижается. Образованию трещин способствует наличие

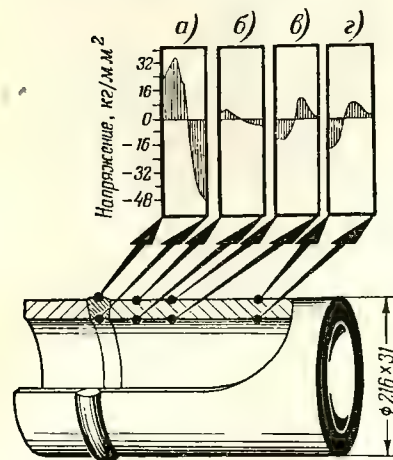


Рис. 39. Распределение тангенциальных напряжений вблизи сварного стыка у трубы, изготовленной из аустенитной стали марки 1Х18Н12Т.

а — в сварном шве; б — в — г — на расстояниях 30, 50 и 200 мм от шва.

Большое и не всегда равномерное сжатие аустенитной стали при охлаждении приводит к тому, что в металле сварных стыков при остывании появляются значительные напряжения, более высокие, чем при сварке труб из перлитной стали (рис. 39). Уменьшение этих напряжений может быть достигнуто тщательным соблюдением технологии сварки труб.

При чрезмерном повышении температуры аустенитной стали возможны изменения ее структуры, а также разрушение металла в результате коррозии.

в трубах механических напряжений, остающихся после ихгиба в холодном состоянии, а также при их жестком креплении, защемлении и пр. Первые трещины обычно возникают в местах защемления или на гibaх труб.

Рассматривая под микроскопом место контактной сварки труб, изготовленных из аустенитной стали, можно видеть, что в зоне сварного шва структура металла изменяется значительно меньше, чем у труб из перлитной стали. Однако при сварке аустенитной стали необходимо учитывать многочисленные трудности и специфические особенности, из которых упомянем лишь одну.

У котлов паропроизводительностью 110 т/ч при 128 ат пар перегревался в пароперегревателе дважды: сперва — при полном давлении и вторично — при давлении 40 ат. Вторичный пароперегреватель был размещен на одной из стен топочной камеры и состоял из двух параллельно включенных пакетов труб диаметром 47,5×5 мм (рис. 40, а). В этих трубах пар перегревался до 430°С, однако их нижняя часть была расположена в зоне ядра факела

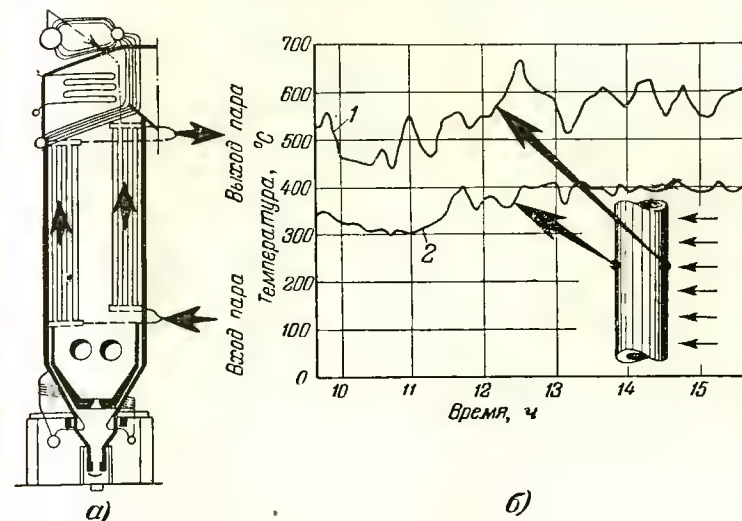


Рис. 40. Условия работы радиационного вторичного пароперегревателя котла паропроизводительностью 110 т/ч при 128 ат.

а — расположение вторичного пароперегревателя на боковой стене топочной камеры; б — изменение с течением времени температуры стенки трубы; 1 — температура стороны трубы, обращенной в топку; 2 — температура стороны трубы, обращенной к обмуровке.

в топке и омывалась паром при давлении 40 ат, который охлаждал металл гораздо хуже, чем пароводяная смесь в экранных трубах. Поэтому температура металла труб на стороне, обращенной в топку, иногда превышала 650°С (рис. 40, б).

Трубы вторичного пароперегревателя были изготовлены из жаропрочной сихромалевоу стали¹. После нескольких лет работы их нижняя, наиболее обогреваемая часть пришла в негодность и была заменена трубами из аустенитной стали марки 1Х18Н9Т. Трещины в аустенитной стали начали появляться после 3—4 лет эксплуатации и объяснялись различными причинами.

¹ Наименование «сихромалевоу сталь» характеризует ее состав: Si (силиций) означает кремний, а следующие слоги указывают на наличие в стали хрома и алюминия. Сихромалевоу сталь относится к перлитному классу.

Одной из причин являлось то, что места прохода через обмуровку нижних концов труб постепенно забивались летучей золой. Это препятствовало свободному расширению мало изогнутых труб при растопке котла. Кроме того, отдельные трубы нагревались и расширялись неодинаково, а их концы были жестко присоединены

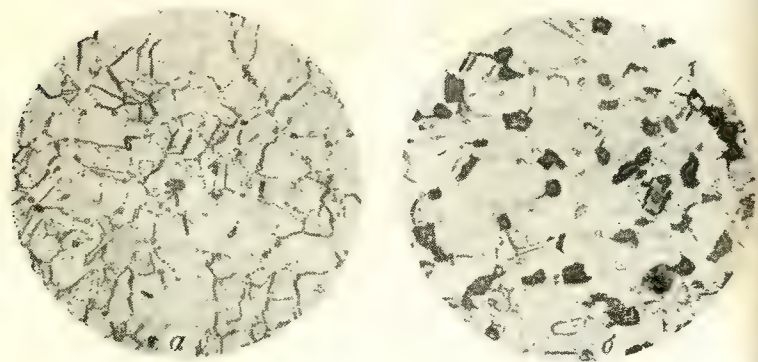


Рис. 41. Изменение структуры аустенитной стали у трубы радиационного пароперегревателя вторичного пара, изображенного на рис. 40.

а—на стороне трубы, обращенной к обмуровке; *б*—на стороне трубы, обращенной в топку.

к общим коллекторам. Поэтому в трубах возникали большие механические напряжения.

Другая причина состояла в изменении структуры аустенитной стали при высоком нагреве напряженных труб и снижении их механической прочности. Об этом говорило то, что в образцах металла, взятых в непосредственной близости от трещин, были обнаружены темные включения (рис. 41).

17. ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

Эрозией называется постепенное разрушение поверхностного слоя металла под влиянием механического воздействия. Наиболее распространенным видом эрозии стальных элементов парового котла является их истирание твердыми частицами золы, движущейся вместе с дымовыми газами. При длительном истирании происходит постепенное уменьшение толщины стенок труб, а затем их деформация и разрыв под действием внутреннего давления. Наиболее сильное истирание труб наблюдается

у котлов, работающих на низкосортных топливах с высокой зольностью (например, на подмосковном и других бурых углях, а также на сланцах). Скорость истирания труб считается пропорциональной кубу скорости газов; следовательно, с увеличением скорости газов вдвое износ увеличивается примерно в 8 раз.

Когда дымовые газы движутся сверху вниз, то наибольшее количество частиц летучей золы ударяется

Зона миксимального износа металла

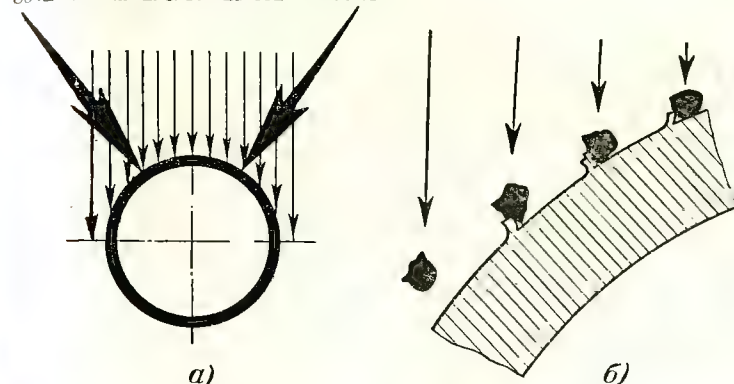


Рис. 42. Схема износа верхней части горизонтальной трубы под действием частиц летучей золы.

а—схема падения частиц золы; *б*—схема срезания пылинками золы кусочков металла.

о самую верхнюю часть наружной поверхности горизонтальных труб (рис. 42, *а*). Однако наиболее сильный износ летучей золой происходит не вдоль верхней образующей этих труб, а в зонах, расположенных примерно под углом 35° по отношению к их вертикальной оси. Объясняется это тем, что механическое воздействие падающих на трубы твердых частиц золы несколько напоминает действие резца в металлорежущем станке: ударяясь о стенку трубы, частицы золы срезают небольшое количество металла с его поверхностного слоя (рис. 42, *б*). Наибольшее количество такой металлической «стружки» может быть снято при остром угле между направлением золотого потока и поверхностью металла.

Золовой износ труб значительно увеличивается вследствие того, что дымовые газы не всегда омывают их равномерно. Наибольший износ наблюдается на гиах труб и вокруг опорных конструкций, а иногда — в местах, где нарушено правильное дистанционирование змеевиков. Известны случаи возникновения неплотностей в трубах по контуру оставшихся на них после ремонта кирпичей, досок и пр.

Основным мероприятием по борьбе с золовым износом труб является уменьшение скорости омывающих их

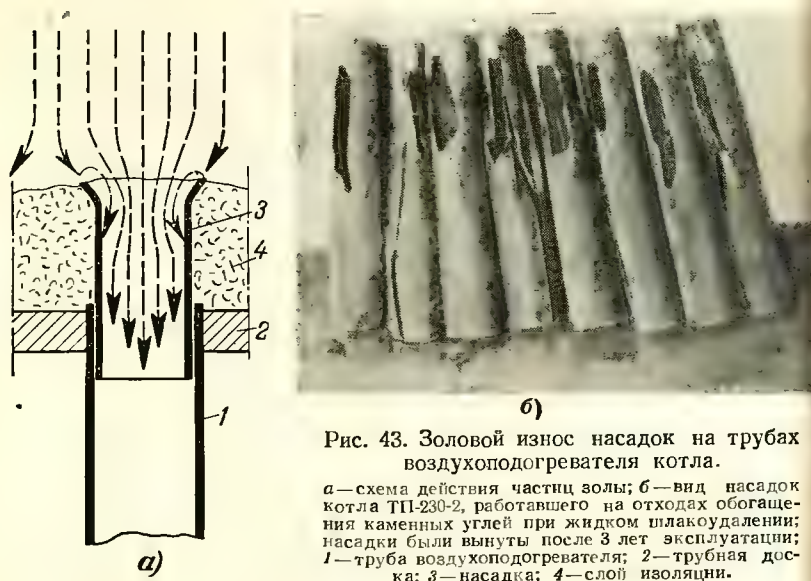


Рис. 43. Золовой износ насадок на трубах воздухоподогревателя котла.

а — схема действия частиц золы; б — вид насадок котла ТП-230-2, работавшего на отходах обогащения каменных углей при жидком шлакоудалении; насадки были вынуты после 3 лет эксплуатации; 1 — труба воздухоподогревателя; 2 — трубная доска; 3 — насадка; 4 — слой изоляции.

дымовых газов. Однако у построенных котлов переделка конструкции не всегда может быть осуществлена. Для уменьшения золового износа стремятся не увеличивать чрезмерно скорость газов, не допускать перекосов в движении газов, следить за отсутствием отложений золы в газоходах и т. п. Большую пользу приносит установка в трубах защитных щитов, которые нужно периодически (по мере износа) заменять новыми.

В трубчатом воздухоподогревателе дымовые газы движутся обычно сверху вниз внутри вертикальных

труб. При установившемся движении частицы летучей золы несутся в средней части сечения труб и не соприкасаются с металлом. Золовой износ происходит только в зоне завихрения газового потока (вблизи его входа в трубы). Истирание верхних концов труб предотвращается установкой цилиндрических защитных насадок, которые с течением времени изнашиваются и должны заменяться (рис. 43).

Другим видом эрозии поверхностей нагрева парового котла является их истирание струей пара или пароводяной смеси, ударяющейся о металл с очень большой скоростью. Это может происходить, например, в случае, когда трубы расположены вблизи сопел паровой обдувки, или если по трубам бьет струя пара или пароводяной смеси из соседних поврежденных труб.

Вода в современном котле всегда имеет температуру выше 100°C , поэтому даже в нижней части экономайзера при разрыве трубы происходит частичное испарение выходящей из отверстия воды, из-за чего дополнительно возрастает скорость потока. Истирание поверхности металла наиболее опасно в котлах высокого давления, в которых паровой или пароводяной поток выходит из отверстия с чрезвычайно большой скоростью. Стенки труб в результате эрозии в данном случае могут быть истерты до разрыва в течение немногих часов, после чего из них также начинает бить струя пара или пароводяной смеси, направленная на другие трубы, и зона повреждения быстро расширяется.

Особым видом эрозии является износ поверхностей нагрева котла металлической дробью при работе дробеструйных золоочистительных устройств. Этот износ зависит от твердости дробин, а также от того, насколько часто производится очистка ею поверхностей нагрева. Под ударами дробин возникают упрочнение (наклеп) тонкого наружного слоя стенок труб и увеличение его твердости более чем в 1,5 раза. При этом истирание труб происходит гораздо медленнее, чем под действием мельчайших частиц летучей золы топлива.

Внутренняя поверхность находящейся под давлением части котла страдает от эрозии очень редко (за исключением арматуры).

У котлов ТП-200-2 паропроизводительностью 200 т/ч при 32 ат насыщенный пар из барабана проходит через дополнительный сосуд 1, именуемый сухопарником (рис. 44,а). В сухопарнике пар движется между трубами поверхностного пароохладителя 3 и частично конденсируется в воду, которая вторично испаряется в пароперегревателе. У нескольких котлов скорость пара в трубах 2 рав-

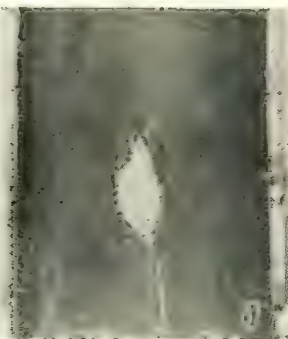
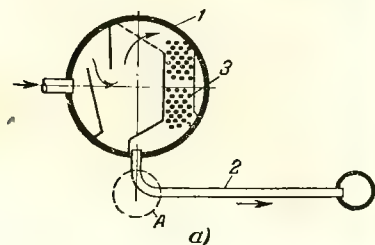


Рис. 44. Истирание влажным паром внутренней поверхности перепускных труб котла ТП-200-2.

а — схема работы перепускных труб; б — вид изношенного участка на гребне трубы.

нялась при полной нагрузке 40 м/сек. Находящиеся в паре капли воды с большой силой ударяются на повороте в стенки труб. У одного из таких котлов после примерно 2 лет работы в зоне А по этой причине появились сквозные свищи (рис. 44,б). Чтобы исключить это, в котле в 2 раза увеличили количество перепускных труб 2, что позволило значительно снизить скорость пара.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПОВРЕЖДЕНИЯ КОТЕЛЬНЫХ БАРАБАНОВ И КОЛЛЕКТОРОВ

18. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БАРАБАНОВ НА ИХ ПРОЧНОСТЬ

Изготовление барабана котла является, пожалуй, наиболее сложным и ответственным процессом во всем котлостроении. Цилиндрическая часть (обечайка) барабана изготавливается различными способами. Иногда она состоит из двух полуцилиндров, которые получают при сгибании стальных листов большой толщины на гидравлическом прессе (рис. 45,а). У советских котлов высокого давления большинство обечаек состоит из нескольких

звеньев (рис. 45,б), которые сгибают на мощных вальцах. Конечно, во всех случаях листы изгибают, нагревая их до высокой температуры.

Днища штампуют (также в нагретом состоянии) из стальной заготовки на гидравлическом прессе большой мощности.

Соединение между собой отдельных элементов барабана осуществляется при помощи электросварочных машин. Раньше сварку кромок изогнутых стальных листов

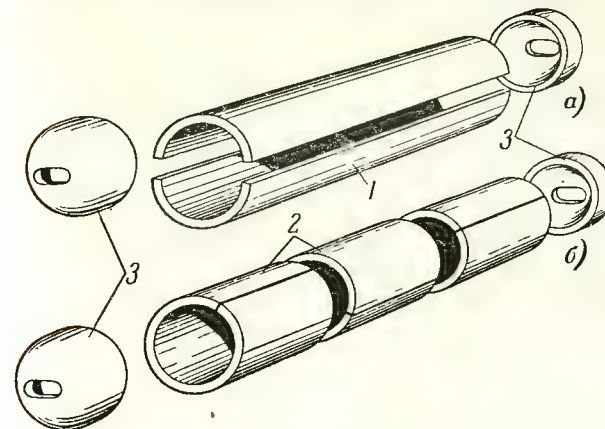


Рис. 45. Схема сопряжения отдельных элементов барабана котла высокого давления.

а — обечайка 1 состоит из двух «корыт», согнутых из стального листа на особом гидравлическом прессе; б — обечайка 2 состоит из нескольких звеньев; 3 — днища.

производили путем многократного наложения небольшого слоя присадочного металла. Такая операция отнимала много времени. Кроме того, для снятия возникающих при сварке внутренних напряжений требовался промежуточный нагрев барабана в печи после наложения нижней половины каждого из сварных швов. Ввиду этого изготовление барабанов еще более усложнилось и удорожалось.

В настоящее время котлостроительные заводы освоили так называемую электрошлаковую сварку, при которой звено барабана устанавливается вертикально и сварочный аппарат медленно движется вдоль шва снизу вверх (рис. 46). Привычная для сварщиков электрическая дуга здесь отсутствует. Действие электрического то-

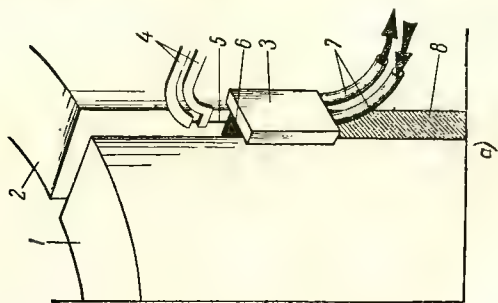


Рис. 46. Электрошлаковая сварка продольного шва обечайки котельного барабана.

а — упрощенная схема; б — вид сварочного аппарата в действии: 1 и 2 — соприкасаемые стенки обечайки; 3 — медная пластина, охлаждаемая проточной водой и перемещающаяся вверх по мере заполнения шва металлом (вторая такая же пластина движется вдоль шва для равномерного заваривания обечайки); 4 — держатель электрода, периодически автоматически в ванну наплавляемого металла б; 5 — электрод, подаваемый автоматически в ванну наплавляемого металла б; 6 — электрод, подаваемый автоматически в ванну наплавляемого металла б; 7 — шланг для подачи и отвода воды, на поверхности которого находится слой жидкого шлака; 8 — затвердевший металл; 9 — сосуд с флюсом.

ка заключается в нагревании слоя присадочного материала (шлака), покрывающего сварной шов. При этом выделяется во много раз большее количество тепла, чем при нагреве металла электрической дугой. Столь большой подвод тепла делает возможным создание в сварном шве широкой ванны жидкого металла, ограниченной с двух сторон свариваемыми кромками стальных листов, а с других двух сторон — медными пластинами, которые непрерывно охлаждаются проточной водой. Присадочная проволока подается особым автоматическим устройством и расплавляется под поверхностью жидкого шлака.

Движение вверх сварочного аппарата рассчитано так, что из-под аппарата освобождается уже застывший металл. Сварочный аппарат лишь один раз перемещается вдоль шва.

Днища котельных барабанов в настоящее время изготавливают из стального листа, имеющего толщину, примерно вдвое большую, чем у обечайки. Расчет показывает, что толщину стальной заготовки можно было бы значительно уменьшить, если бы днище не было ослаблено лазовым отверстием, вокруг которого резко увеличивается напряжение в металле (рис. 47). Вследствие этого заготовка должна иметь в середине гораздо большую толщину и по ее краям приходится удалять значительную часть металла.

Днище можно изготавливать и из плоского листа, но тогда его среднюю часть приходится усиливать путем присоединения электросваркой дополнительного стального кольца.

При изготовлении котельных барабанов и камер необходимо считаться с тем, что металл, из которого они выполняются, имеет не вполне однородное строение. Объясняется это условиями затвердевания жидкой стали после ее выпуска из металлургической печи. Сначала затвердевает поверхностный слой стального слитка,

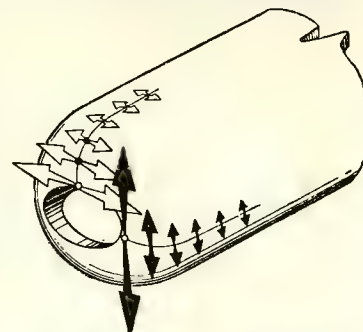


Рис. 47. Усилия, стремящиеся разорвать стенку барабана (резко увеличиваются у края лазового отверстия).

Внутренняя же его часть остается расплавленной более длительное время. Находящиеся в стали примеси распределяются при таком остывании неравномерно по толщине слитка. После проката, когда стальной слиток принимает вид толстого листа, в нем остаются зоны с повышенным содержанием серы, имеющие пониженную прочность.

На рис. 48 изображена камера, в которой днище изготовлено на токарном станке из листового металла большой толщины. Для котлов высокого давления заготовку такого днища проковывают; при этом сернистый марганец и другие примеси, сосредоточенные

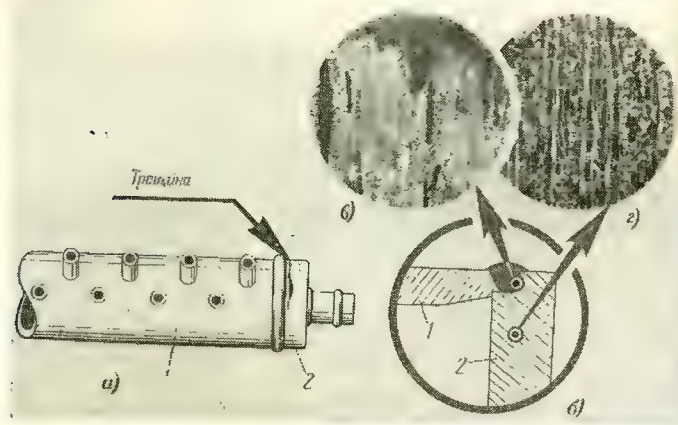


Рис. 48. Трещина в плоском днище камеры пароперегревателя. а—вид конца камеры с трещиной, появившейся на границе кольцевого сварного шва; б—приварка днища 2 к цилиндрической части 1 камеры; в—трещины в металле; 2—структура металла днища (увеличено в 35 раз).

в зонах пониженной прочности, рассредоточиваются в большом объеме металла. На рисунке показана также трещина в плоском днище камеры пароперегревателя, появившаяся после 2 лет эксплуатации и вызванная тем, что заготовка днища была недостаточно тщательно прокована на котлостроительном заводе.

Все котельные барабаны после изготовления подвергаются термической обработке; однако и после нее структура металла в швах, а также вблизи швов значительно отличается от структуры основного металла. Трещи-

ны в наплавленном металле возникают чаще, чем в основном металле. В сварном шве допустимо сверление лишь единичных отверстий малого диаметра, поскольку у стенок отверстий возникают тем большие дополнительные напряжения, чем больше диаметр отверстий.

При механической обработке внутренней поверхности кованого барабана с внутренним диаметром 1300 мм было допущено местное уменьшение толщины стенки и для восстановления ее проектной толщины наплавлен слой металла 9 мм. После 4300 ч работы были обнаружены трещины в зоне наплавки глубиной до 35 мм, расположенные между трубными отверстиями для пароперепускных труб (рис. 15). Барабан был демонтирован и заменен новым.

Перед изготовлением барабана качество металла проверяется отдельно у каждого стального листа. В готовом барабане при помощи рентгеновских аппаратов проверяют качество сварных швов. Однако иногда необнаруженные дефекты выявляют при монтаже или ремонте котла. Они должны немедленно полностью устраняться, поскольку разрыв стенки барабана может привести к очень большим разрушениям.

Во время капитального ремонта однобарабанного котла паропроизводительностью 50 т/ч при давлении 80 ат была обнаружена трещина в сварном шве на внутренней поверхности днища. Протравливание кислотой поверхности металла вокруг трещины и сверление контрольных отверстий позволили установить, что трещина была старой и что она была обнаружена при приварке днища к обечайке барабана на заводе. Было видно, что тогда металл в зоне трещины был вырублен и затем образовавшуюся щель заплывили электросваркой. Однако вырубка не была осуществлена на всю глубину трещины. Внутренняя трещина постепенно увеличивалась и, наконец, появилась на поверхности металла.

Срок ремонта котла пришлось удлинить. Металл вокруг трещины был вырублен на большую глубину и заново наплавлен.

Барабаны обычно не обогреваются дымовыми газами, и температура их стенок не может быть выше температуры кипения воды в котле; поэтому для изготовления барабанов обычно применяют качественную углеродистую или слабо легированную сталь.

В СССР у первых котлов высокого давления барабаны были изготовлены из молибденовой стали марки 15М, содержащей около 0,5% молибдена. До последнего времени наиболее часто применяли сорта стали марок 22К и 16ГНМ (см. табл. 1).

19. ПОВРЕЖДЕНИЯ В МЕСТЕ ПРИСОЕДИНЕНИЯ КОНЦОВ ТРУБ К БАРАБАНАМ И КОЛЛЕКТОРАМ КОТЛА

Одним из наиболее старых способов присоединения концов труб к барабанам и сборным камерам является их развальцовка. Процесс развальцовки заключается в том, что с помощью особого инструмента (вальцовки) концы труб несколько раздаются, т. е. увеличиваются в диаметре, чем обеспечивается их прочное прижатие к краям трубных отверстий. Особыми роликами производится отбортовка торцового участка труб, выступающего внутрь барабана или коллектора, т. е. несколько большее увеличение его диаметра, чем на развальцованном участке.

Увеличение диаметра конца трубы является пластической деформацией металла и может происходить только тогда, когда напряжение в нем при развальцовке достигает предела текучести. Металл барабана вблизи трубного отверстия испытывает несколько меньшее напряжение, чем вальцоваемый участок трубы, но, как показали измерения, в нем также возникает небольшая пластическая деформация.

При развальцовке происходит не только увеличение диаметра деформируемого конца трубы, но и его удлинение. Выступающий внутрь барабана небольшой участок (колокольчик) увеличивается в длине примерно на 1,5 мм. Наружный слой металла трубы перемещается в длину только до того момента, пока труба не будет прижата к краям трубного отверстия, после чего металл в наружном слое трубы почти перестает удлиняться. Удлинение же внутреннего слоя продолжается, и он несколько перемещается относительно наружного. Чем длиннее развальцованный участок трубы, тем больше это взаимное смещение слоев металла.

Канавки 4 в стенках отверстий для труб (рис. 49, а) делают не столько для увеличения прочности, сколько для уменьшения высоты каждого из развальцованных участков и соответствующего снижения напряжения в металле. На этом же рисунке показано, что у котлов высокого давления развальцовка труб в толстостенных барабанах производится лишь на части высоты трубного отверстия. Увеличение высоты развальцованного участка привело бы к возрастанию перемещения внутреннего

слоя трубы относительно наружного, что создало бы в металле дополнительные напряжения.

Повреждение вальцовочных соединений иногда объясняется неудовлетворительной развальцовкой концов труб: их недовальцовкой, перевальцовкой, недостаточной предварительной очисткой сопрягающихся поверхностей, дефектами инструмента и пр. Однако большие внутренние напряжения всегда имеются и при правильной раз-

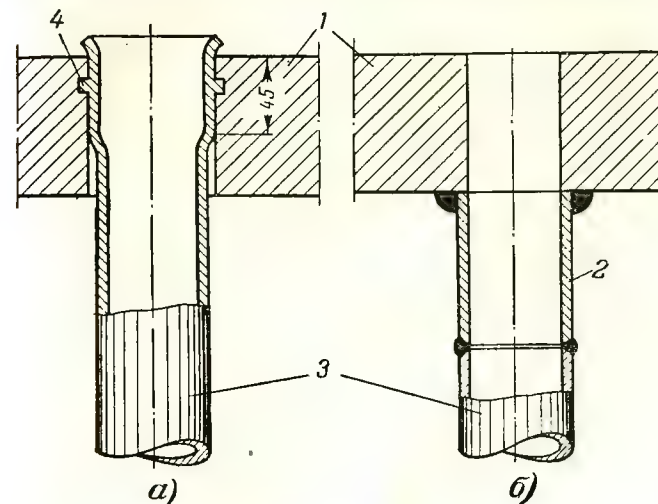


Рис. 49. Присоединение труб к барабану котла высокого давления.

а — вальцовочное; б — сварное; 1 — стенка барабана; 2 — приварной штуцер; 3 — труба; 4 — кольцевая канавка в трубном отверстии барабана котла.

вальцовке. Если какая-либо труба подвергается воздействию чрезмерных усилий, то первым повреждается ее развальцованный участок как наиболее слабое место. Тогда между трубой и стенкой трубного отверстия в барабане или коллекторе возникает неплотность, а иногда появляются трещины. Как правило, трещины сначала поражают трубу, и лишь в дальнейшем они появляются в стенках барабана или коллектора. Даже ничтожные неплотности могут с течением времени увеличиваться, поэтому их нужно своевременно устранять. Места неплотностей можно обнаружить и на неработающем котле по слою солевых отложений вокруг них.

У труб трещины обычно появляются на наружной поверхности и, как правило, имеют вид кольцевых (рис. 50). В теле барабана трещины обычно расходятся как лучи от трубных отверстий (рис. 51).

Повреждение вальцовочных соединений во время эксплуатации парового котла может быть вызвано различ-

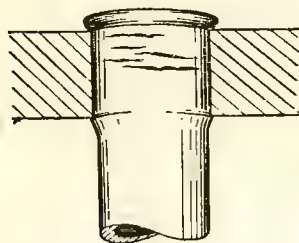


Рис. 50. Кольцевые трещины на наружной поверхности развальцованного участка трубы.

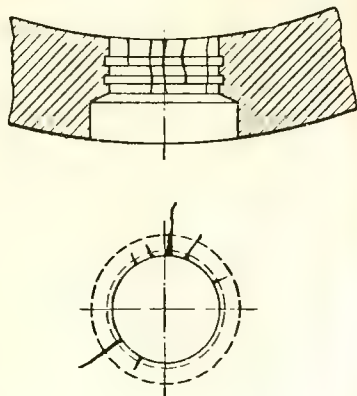


Рис. 51. Радиальные трещины в барабане котла паропроизводительностью 70 т/ч при давлении 120 ат вокруг трубного отверстия.

ными причинами. Рассмотрим некоторые из них.

1. Это может произойти при недостаточном тепловом расширении экранных труб в период растопки или остановки котла вследствие, например, неправильного монтажа растяжек или от того, что трубы, удлиняясь при нагревании, упираются в обмуровку или лежащий на обмуровке слой золы.

У нескольких котлов паропроизводительностью 110 т/ч при давлении 128 ат была выполнена переделка нижней части топочной камеры (рис. 52). При этом были закрыты кирпичом наклонные участки труб в холодной воронке 1 и установлен плоский щит 2, который опирался не на экранные трубы, а на неподвижные кирпичные своды 3. Через несколько месяцев почти у всех котлов появились кольцевые трещины в местах развальцовки верхних концов экранных труб в барабанах. Вместе с тем ни одной кольцевой трещины не было обнаружено у труб боковых экранов, которые располагались над пылеугольными горелками и не доходили до упомянутого выше дополнительного утепления холодной воронки. Последнее обстоятельство свидетельствовало о том, что причиной появления кольцевых трещин было защемление труб новым утепляющим устройством.

При первых растопках котлов после реконструкции топочной камеры экранные трубы перемещались вниз. В период работы котлов жидкий шлак протекал между дополнительно установленными кирпичами и застыл вокруг труб, «приклеивая» их к неподвижным кирпичным конструкциям. Охлаждаясь после прекращения работы котлов, трубы не могли свободно укорачиваться и с большой силой тянули барабан вниз. Вследствие этого в местах развальцовки труб возникали чрезмерные напряжения и появлялись кольцевые трещины.

2. Вальцовочные соединения могут быть повреждены при быстром их охлаждении. При омывании относительно холодной водой развальцованные концы труб сжи-

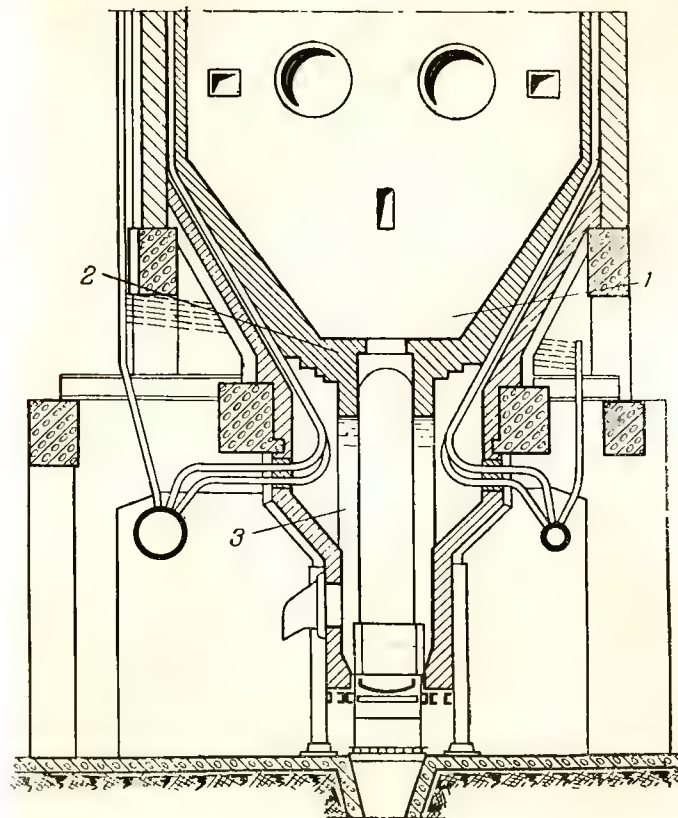


Рис. 52. Конструкция холодной воронки, в которой возникло защемление нижней части экранных труб.

маются и немного отстают от стенок трубных отверстий. В результате этого образуются неплотности, которые обычно не исчезают и после выравнивания температуры. Опасно даже случайное кратковременное и сравнительно небольшое охлаждение развальцованных концов труб.

При резком нагревании вальцовочных соединений (например, при заполнении котла перед растопкой относительно горячей водой) концы труб нагреваются гораздо быстрее массивного барабана. Такая разность температур менее опасна, поскольку трубы, расширяясь, не отстают от стенок трубных отверстий, а еще сильнее прижимаются к ним.

Развальцовку труб производят изнутри барабана или через особые лючки на коллекторах. Наличие большого количества таких лючков у котлов высокого давления нежелательно, так как это увеличивает возможность появления неплотностей; поэтому почти у всех котлов высокого давления трубы присоединены к сборным коллекторам на сварке. Начиная с 1956 г., таким же способом присоединяют трубы и к барабанам.

Сварное соединение прочнее вальцовочного. Кроме того, отверстия в барабане можно сверлить не по наружному, а по внутреннему диаметру труб. Стенки барабана меньше ослабляются трубными отверстиями. При одинаковой толщине и качестве металла барабан с приварными трубами может иметь больший диаметр, чем барабан, в котором трубы развальцованы.

При наложении сварного шва на поверхность толстостенной камеры наплавленный металл быстро охлаждается и в нем возникают высокие напряжения. Для их снятия необходима термическая обработка камеры. Такая термическая обработка не может быть произведена в монтажных условиях, поэтому на котлостроительном заводе к барабанам и камерам приваривают короткие штуцера 2 (см. рис. 49,б), а при монтаже котла трубы приваривают к этим штуцерам. Приварка штуцеров к камерам производится на заводе особыми сварочными автоматами.

Повреждение мест приварки штуцеров к камерам возникает редко даже в котлах, у которых эта приварка была произведена вручную.

20. ВЛИЯНИЕ ЧРЕЗМЕРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В МЕТАЛЛЕ

Имеется много примеров повреждения барабанов и коллекторов в результате чрезмерно большого напряжения в металле. Это напряжение может быть вызвано действием внешних механических сил, неравномерным нагреванием или охлаждением. Опасными являются даже весьма малые трещины, около которых возникает концентрация напряжений и которые в дальнейшем постепенно увеличиваются. Рост этих трещин под действием коррозии может продолжаться и после устранения вызвавшей их причины.

Котел паропроизводительностью 150 т/ч на 32 ат был введен в эксплуатацию зимой. После очередной остановки котла произошло замерзание котловой воды в нижних экранных камерах. Под коглом появилась течь воды из-под обшивки. После удаления обшивки обнаружили трещину между двумя трубными отверстиями в нижнем коллекторе правого бокового экрана, относящегося к соленому отсеку ступенчатого испарения. Металл вокруг трещины вырубил и наплавил электросваркой. Других неплотностей в экранных камерах при гидравлическом испытании обнаружено не было.

Впоследствии при ремонте котла у нижних камер экранов соленых отсеков обнаружили следы солей от просачивания котловой воды через несколько неплотных вальцовочных соединений. Оказалось, что развальцованные концы труб не были повреждены, но в «мостиках» между трубными отверстиями в стенках коллекторов имеются трещины (рис. 53). Поврежденные коллекторы пришлось заменить новыми.

Было очевидно, что трещины появились в результате замерзания воды в коллекторах. Закономерным являлось также появление трещин в «мостиках» между трубными отверстиями, где металл испытывает наибольшие напряжения.

Характерным было не только отсутствие повреждений у экран-

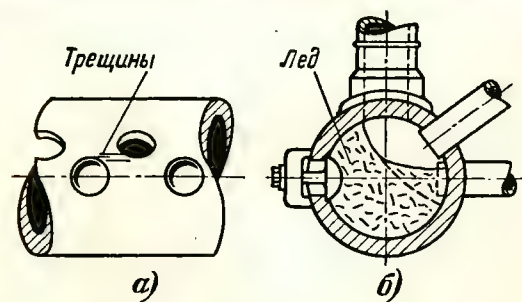


Рис. 53. Трещины в «мостиках» между трубными отверстиями нижних экранных коллекторов.

а — направление трещин между трубными отверстиями; б — предполагаемая зона замерзания воды.

ных труб, но и то, что все (кроме одного) поврежденные участки коллекторов расположены между горизонтальным трубным отверстием и наклонным отверстием, находившимся справа от горизонтального. Последнее можно объяснить следующим образом. Зимой при остановках топочная камера котла не охлаждалась до минусовой температуры, поэтому вода в экранных трубах, расположенных внутри топки, оставалась относительно теплой. Еще медленнее она охлаждалась в барабане котла. Вследствие этого в экранных трубах возникало непрерывное движение воды, препятствующее ее замерзанию. Точно так же циркулирующая вода обогревала стенки наружных водоопускных труб, препятствуя образованию в них льда. Но в нижних экранных коллекторах котловая вода не могла в достаточной степени обогревать толстостенные стальные камеры, поэтому-то замерзание воды и началось в коллекторах. Слои льда, расширяясь, вызывал значительные растягивающие напряжения в стенках коллекторов, где появились неплотности и трещины.

Трещины в теле коллекторов возникали по линиям максимальных напряжений, которые после развальцовки труб направлены по касательным к краям трубных отверстий (рис. 53,а). В гл. 2 указывалось, что максимальные растягивающие силы действуют по продольному сечению коллектора, но линии наибольших напряжений расположены вдоль коллектора только справа от его горизонтальных отверстий (если смотреть снаружи). Там и появились первые трещины.

Замерзание воды в нижних экранных камерах является далеко не единственной причиной, вызывающей в металле недопустимо большие напряжения. Приведем еще один пример.

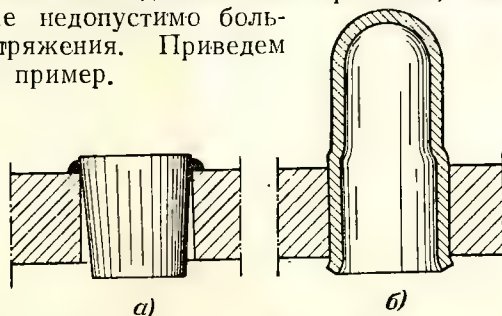


Рис. 54. Закрытие лишних отверстий в барабане котла.

а — неправильно, б — правильно.

При реконструкции котла, рассчитанного на давление 32 ат, были заглушены 22 отверстия в его верхнем и нижнем барабанах. Конические заглушки присоединили электросваркой.

При ремонте котла после 4-месячной работы обнаружили течь в месте приварки одной из заглушек. После ее удаления стала видна радиальная трещина в металле барабана. Удаление остальных заглушек дало возможность обнаружить подобные трещины и в трех других трубных отверстиях.

Аналогичные последствия имели место при установке конических заглушек на барабанах и экранных коллекторах котла, рассчитанного на давление 128 ат. Заглушки забивались в отверстия ударами кувалды и обваривались (рис. 54,а). Около 50 таких заглушек оказались неплотными уже при наполнении котла водой. Они были подварены, но при гидравлическом испытании появилась течь у других заглушек. В дальнейшем в трех трубных отверстиях экранного коллектора были обнаружены радиальные трещины и при выбивании заглушек вместе с ними откалывались куски металла. Все заглушки пришлось удалить. Поврежденный коллектор заменили новым.

В обоих случаях повреждение котельных барабанов вызывалось тем, что конические заглушки воздействовали на узкую кромку металла вокруг трубных отверстий и создавали там очень большое местное напряжение. В дальнейшем в напряженном металле происходило интегсивное коррозионное разрушение. При температуре металла около 240—330°С только действием коррозии можно объяснить то, что после выбивания заглушек иногда можно было даже рукой отламывать от тела барабана отдельные кусочки металла.

Применение конических заглушек теперь запрещено. Лишние отверстия в барабанах в камерах заглушают цилиндрическими колпачками, которые присоединяют на сварке или с помощью развальцовки (рис. 54,б). Колпачки должны быть обращены торцом вверх, чем предотвращается образование в них застойной объема воды.

Еще опаснее напряжения в металле при попеременном нагревании и охлаждении какого-либо участка барабана или коллектора. Под действием таких напряжений могут появиться трещины тепловой усталости.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ТЕПЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ КОТЕЛЬНОЙ СТАЛИ

Еще в первой половине XIX в. без видимой причины ломались после многолетней работы валы машин, оси колес и т. п. Причину таких повреждений долго не могли объяснить. Сначала предполагали, что с течением времени изменяется структура стали. Однако многочисленные исследования показали, что в местах поломки строение кристаллической решетки стали не отличается от обычного. Качество металла в поломанных деталях было вполне удовлетворительным, а рабочие нагрузки не превышали допустимых.

Было замечено, что при переменных нагрузках в деталях возникают трещины, которые постепенно увеличиваются и проникают в глубь изделий. Край трещин при изменениях нагрузки то расходятся, то смы-

каются. В основании трещин периодически возникает более высокое напряжение, чем в неповрежденном сечении. Это вызывает дальнейшее развитие трещин.

Было установлено, что при переменных нагрузках первые трещины появляются преимущественно в местах, где по каким-либо причинам получается концентрация напряжений, т. е. там, где напряжения в детали значительно больше среднего. Концентрация напряжений возникает, например, в надрезах, острых выточках и т. п. (рис. 55, а и б).

В прошлом столетии такие разрушения металла были названы его усталостью. Этот термин сохранился до настоящего времени.

Усталостные трещины иногда возникают у вспомогательных механизмов котельного цеха электростанции. Но для самих котлов наиболее опасны не колебания механической нагрузки, а многократные резкие изменения температуры металла. При работе котла стенки барабанов, камер и труб всегда нагреты неравномерно. Более нагретые участки металла стремятся расшириться, но

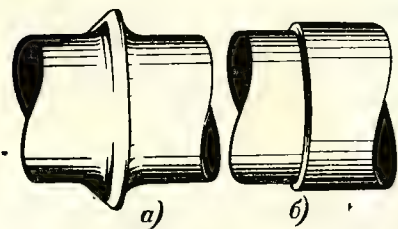


Рис. 55. Правильная (а) и вызывающая усталость металла (б) конструкции оси паровоза [Л. 17].

этому препятствуют менее нагретые участки. Вследствие этого в металле возникают дополнительные напряжения, называемые температурными. Колебания температуры вызывают соответствующие колебания величины температурных напряжений, и если металл многократно быстро нагревать и охлаждать, в нем образуются трещины, именуемые трещинами тепловой усталости (рис. 56).

Такие трещины появлялись, например, при движении пароводяной смеси в горизонтальных участках труб прямоточных котлов Рамзина. Они возникали преимущественно в трубах, расположенных на стенах топочной камеры. При движении пароводяного потока в этих горизонтальных трубах происходило расслоение пароводяной смеси: вода текла в нижней части труб, а пар двигался над ней. Температура в нижней и верхней частях

труб различалась тогда на несколько десятков градусов. При этом в зоне колеблющегося уровня воды металл то резко охлаждался водой, то снова нагревался.

В обычных экранных трубах обращенная к топке сторона также всегда нагревается при работе котла до более высокой температуры, чем сторона, обращенная в сторону обмуровки. При этом в металле, конечно, возникают дополнительные напряжения, но не появляются трещины, так как почти отсутствуют резкие колебания температуры.

Разрушение металла вследствие тепловой усталости может происходить у различных пароохладителей, в которых систематически резко изменяется температура охлаждающей воды. Уже сравнительно давно обратили внимание на то, что в отдельных пароохладителях поверхностного типа после эксплуатации в течение 1—2 лет появляются неплотности в трубных досках. Было замечено также, что большинство быстро изнашивавшихся пароохладителей работало не на районных электростанциях, а на металлургических заводах. Последнее объяснялось тем, что температура перегретого пара резко возрастает при сжигании доменного газа, который на большинстве металлургиче-

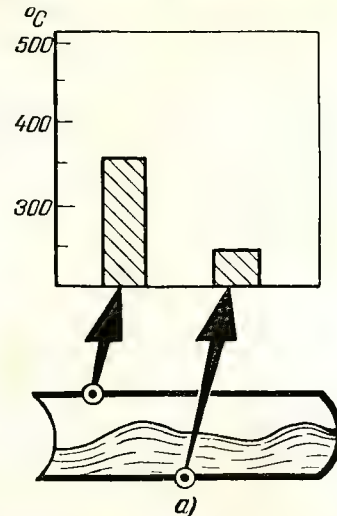


Рис. 56. Поперечные трещины на внутренней поверхности горизонтальной трубы испарительного участка прямоточного котла. а — схема изменения температуры стенки по окружности трубы при раздельном движении в ней воды и пара; б — вид поврежденной трубы.

ских заводов в котельную периодически подается в разном количестве, что вызывает многократные резкие изменения температуры металла при включениях и выключениях пароохладителей.

В последние годы широкое распространение получили пароохладители впрыскивающего типа, в которых снижение температуры пара происходит при впрыске относительно холодной воды. Капли этой воды, падая на стенки коллектора 3 (рис. 57), могли бы вызвать их

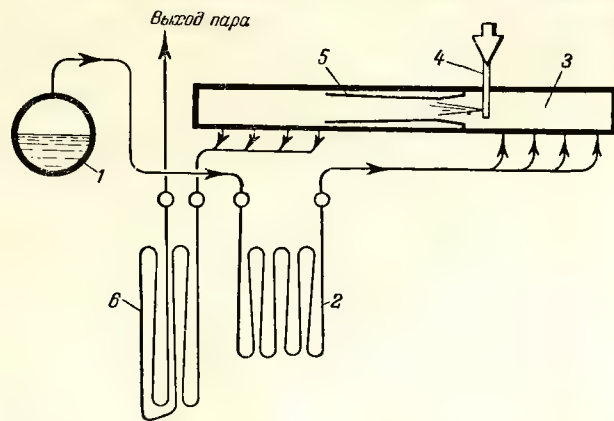


Рис. 57. Схема работы впрыскивающего пароохладителя. 1—барабан котла; 2—первая по ходу пара часть пароперегревателя; 3—коллектор пароохладителя; 4—форсунка для впрыскивания охлаждающей воды; 5—защитная рубашка, предохраняющая корпус 3 от резкого охлаждения брызгами воды; 6—вторая часть пароперегревателя.

растрескивание. Поэтому внутри пароохладителя установлена защитная рубашка 5, в которой отсутствуют механические напряжения и которая растрескивается гораздо медленнее, чем находящийся под давлением коллектор. К тому же рубашка может длительно работать и с трещинами.

Трещины возникали и в трубах радиационных пароперегревателей среднего давления, расположенных подобно экраным трубам на стенах топочной камеры. Эти трещины появлялись при отсутствии в трубах капель относительно холодной воды и, следовательно, при менее резких изменениях температуры. Образование трещин объяснялось изменением структуры металла при высокой температуре и уменьшением прочности труб.

На рис. 58 показана одна из конструкций защитной рубашки, устанавливаемой в месте входа в барабан питательной воды. Здесь стенка барабана не соприкасается непосредственно с трубой, по которой подается вода, и колебания температуры не вызывают опасных колебаний напряжений. Такие рубашки следует ставить не только в местах присоединения к барабану питательных труб и труб для ввода фосфатов, но и вокруг нижних штуцеров водоуказательных колонок. Последнее объясняется тем, что в верхней половине всех водоуказательных колонок непрерывно происходит охлаждение пара и

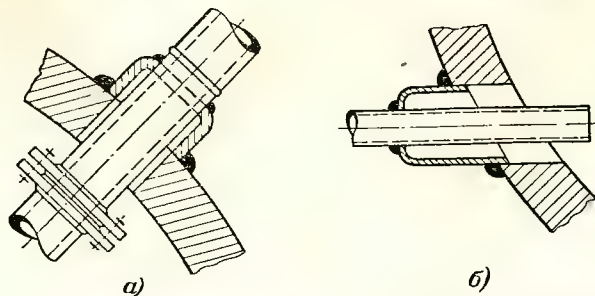


Рис. 58. Установка защитных рубашек в местах прохода труб через стенку барабана котла. а—на входе в котел питательной воды; б—на нижнем штуцере водоуказательной колонки.

конденсация его. Излишек воды отводится по нижней трубке в барабан и по пути дополнительно охлаждается. При продувке водоуказательной колонки температура в штуцере резко увеличивается до температуры воды в барабане, а после продувки она снова снижается.

Барабан котла паропроизводительностью 70 т/ч при давлении 120 ат был изготовлен из стали, содержащей около 5% никеля. Труба к водоуказательной колонке (из стали марки 15М) присоединялась к барабану без защитной рубашки. Колонка была отнесена от барабана на 12 м, что способствовало более интенсивной конденсации пара, чем у других котлов.

После 4000 ч работы этого котла в барабане была обнаружена сквозная трещина, которая начиналась от нижнего штуцера водоуказательной колонки и доходила до соседнего отверстия в барабане.

Тепловая усталость деталей парового котла может стать причиной аварий с тяжелыми последствиями.

У котла паропроизводительностью 120 т/ч с параметрами пара 65 ат и 450°C доступ внутрь коллекторов перегретого пара обеспечивался тем, что на их торцы были установлены на резьбе и

затем приварены фланцы, к которым болтами присоединили заглушки. В годы войны на ТЭЦ временно создались тяжелые условия эксплуатации и происходило большое число бросков воды из барабана в пароперегреватель. При этом происходило резкое понижение температуры перегретого пара. Температура коллектора также многократно быстро снижалась на $180-200^{\circ}\text{C}$, фланец же охлаждался гораздо медленнее. Сравнительно мало охлаждалась и соединенная с фланцем торцовая часть коллектора. В результате в металле возникли трещины тепловой усталости, которые не были вовремя замечены.

Отрыв торца коллектора произошел вблизи кольцевого сварного шва, по которому был приварен фланец. Торцовый участок вместе с фланцем и заглушкой были отброшены далеко от котла, а струя пара из отверстия причинила большие разрушения.

Аналогичные трещины были впоследствии обнаружены на таком же коллекторе однотипного котла. Немедленное выключение из работы этого котла было бы связано с большими трудностями, поэтому к поврежденному коллектору приварили «уши», к которым присоединили стальные прутья, прочно удерживавшие торцовую конструкцию. Когда, наконец, котел был отключен, дополнительное крепление сняли; после этого при первом же ударе кувалдой торцовая часть коллектора вместе с фланцем и заглушкой отломилась по имевшимся трещинам.

ГЛАВА ШЕСТАЯ КОРРОЗИЯ СТАЛИ

Коррозией металла называется его постепенное разрушение, возникающее на поверхности и происходящее вследствие химического или электрохимического воздействия окружающей среды. В бытовых условиях наиболее распространенным видом коррозии является химическое соединение железа с кислородом воздуха (ржавление). Этот вид коррозии является весьма опасным для металла современного парового котла, в котором при высоком давлении и температуре реакция протекает весьма интенсивно.

Коррозия не всегда является только химическим процессом. На смоченной водой поверхности металла появляется большое число элементарных участков, в которых начинает протекать слабый электрический ток. При этом в углеродистой стали анодами становятся зерна феррита, а катодами — загрязнения и неметаллические включения, а также находящиеся на поверхности металла ржавчина и окалина. Очень слабые электрические токи возникают даже между зернами феррита и перлита. Размеры элементарных анодов и катодов могут различаться во много раз.

Под действием электрического тока происходят электролитическое разрушение поверхности металла и постепенное накапливание на ней перенесенных током частиц. Такое же накапливание продуктов коррозии происходит и при чисто химическом разьедаении металла. Как при химической, так и при электрохимической коррозии поверхность труб или барабана котла с течением времени покрывается тонким слоем продуктов разрушения металла. Они образуют защитную пленку, которая препятствует дальнейшей химической реакции, а также создает дополнительное сопротивление для прохождения электрического тока.

Практически химический и электрохимический виды коррозии могут быть опасными только тогда, когда по каким-либо причинам защитная пленка не образуется или происходит систематическое разрушение этой пленки. В результате коррозии поверхность металла становится неровной, бугристой, на ней с течением времени могут появиться глубокие коррозионные язвы.

21. КИСЛОРОДНАЯ КОРРОЗИЯ

Питательная вода паровых котлов должна очищаться от кислорода (деаэрироваться) очень тщательно. Для котлов высокого давления содержание кислорода в ней не должно превышать $0,015 \text{ мг/л}$. Иными словами, кислорода должно быть не более $1,5 \text{ г}$ на 100 м^3 воды. Известны случаи, когда при отсутствии деаэрации питательной воды котлы быстро выходили из строя.

При неудовлетворительной деаэрации питательной воды происходит коррозия питательного тракта (трубопроводов, насосов, арматуры, подогревателей и т. п.) и в котел вносятся окислы, являющиеся продуктами этой коррозии, а также возникает коррозия экономайзера.

Весь растворенный в питательной воде кислород выделяется при кипении. Поэтому можно предполагать, что в барабане котла весь поступающий из экономайзера растворенный кислород отделяется от воды и уходит вместе с паром в пароперегреватель, минуя экраны котла.

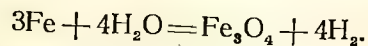
Кислородная коррозия металла усиливается с повышением давления и температуры воды, а также при увеличении содержания в ней кислорода.

Скорость кислородной коррозии можно в значительной мере уменьшить за счет добавки в питательную воду

некоторых веществ. Например, едкий натр и фосфаты, растворенные в питательной воде, способствуют образованию на поверхности металла защитной пленки, затрудняющей соприкосновение кислорода с металлом. При этом коррозия сосредоточивается в немногих местах (например, в трещинах), общая же ее интенсивность уменьшается.

22. ПАРОВОДЯНАЯ КОРРОЗИЯ

При температуре выше 400°C возможно непосредственное химическое взаимодействие железа с водяным паром. При этом реакция протекает по формуле



В результате этого металл покрывается тонкой пленкой окиси железа, которая при температуре $400\text{--}450^{\circ}\text{C}$ способна предохранять металл от дальнейшего разрушения. Такая пленка образуется, например, на лопатках первых ступеней паровых турбин. При этом происходит потемнение (воронение). Вороненные лопатки турбин работают без коррозионного разъедания очень длительное время. Однако при увеличении температуры углеродистой стали выше 500°C такая пленка уже не защищает металл и он интенсивно разрушается от коррозии. Такая коррозия называется пароводяной.

Процесс пароводяной коррозии металла ускоряется, если пар, находящийся в трубах, неподвижен или движется с малой скоростью. Выделяющийся в процессе коррозии водород задерживается тогда у разъедаемой поверхности металла, проникает в него и способствует более быстрому разрушению его.

Серийный котел ТП-230-2 в первый период эксплуатации имел очень малую нагрузку (30—40% номинальной), включался периодически, работая лишь около 4 суток ежемесячно. Остальное время котел останавливали или держали в горячем резерве при давлении пара 10 ат. После 2,5 мес. такой эксплуатации произошел разрыв трубы в верхнем пакете экономайзера, причем диаметр трубы был увеличен на значительной длине.

Деформированный участок трубы был заменен новым, и котел снова был включен, но уже после нескольких часов работы произошел разрыв другой трубы экономайзера.

Осмотр экономайзера показал, что внутренняя поверхность верхних камер покрыта черным налетом закись-окиси железа; это указывало на наличие интенсивной коррозии в верхней части экономайзера.

При промывке водой было выявлено, что в трубе, у которой при разрыве раскрытие было невелико (рис. 59,а), все сечение заполнено продуктами коррозии. Видимо, в другой поврежденной трубе (рис. 59,б) продукты коррозии были выброшены наружу водой, выходящей с большой скоростью через широко раскрывшееся отверстие. Большое количество продуктов коррозии имелось и в соседних трубах.

Состав металла обеих исследованных труб соответствовал стали марки 20, но структура металла претерпела изменения: начался

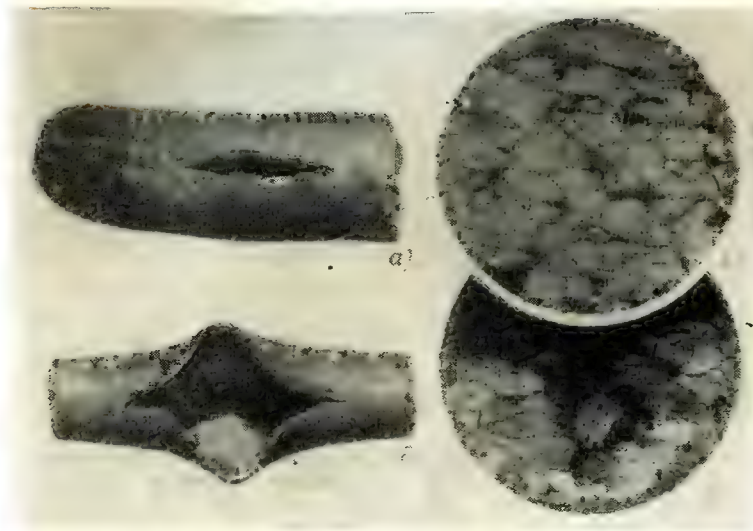


Рис. 59. Внешний вид поврежденных участков труб экономайзера и структура металла (при увеличении в 250 раз).

а — сквозная трещина на гйбе трубы; б — широкое раскрытие места повреждения; в — изменение структуры перлита, свидетельствующее о высоком нагреве металла; г — разъеденная коррозией внутренняя поверхность трубы.

распад перлита, свидетельствовавший о чрезмерном нагреве труб (рис. 59,в).

В периоды, когда котел находился в горячем резерве, змеевики экономайзера омывались газами, температура которых превышала температуру кипения воды при 10 ат. Питание котла водой в эти периоды производилось в течение коротких промежутков времени по 2—3 раза в смену. При длительных перерывах в питании вода в верхней части экономайзера частично испарялась, но при температуре около $200\text{--}250^{\circ}\text{C}$ коррозия металла возникнуть не могла.

Опасным являлся первый период работы котла после его вывода из горячего резерва. В котле сжигался доменный газ, и продукты горения при входе в газопод экономайзера имели температуру $500\text{--}540^{\circ}\text{C}$. При малой нагрузке котла вода проходила через

змеевики с малой скоростью и не могла удалять из труб паровые пробки. Поэтому неподвижный пар перегревался и начиналась пароводяная коррозия внутренней поверхности труб.

Если бы котел длительно работал в таких условиях, в трубах возникли бы повреждения вследствие их нагрева до высокой температуры, но продукты коррозии успели бы отложиться в большом количестве. Однако после непродолжительной работы котел выключали и тогда еще не остывший тонкий слой влажных окислов железа способствовал возникновению быстрой стояночной коррозии.

23. ЩЕЛОЧНАЯ ХРУПКОСТЬ

Этот вид коррозии, называемый также каустической хрупкостью, а также межкристаллитной коррозией, иногда приводит к значительным повреждениям паровых котлов. Трещины возникают, например, в барабанах у отверстий с развальцованными трубами, а также в развальцованных концах экранных и кипяtilьных труб. В отдельных случаях происходит значительное разрушение стенок барабанов.

В котлах старых конструкций отдельные элементы барабанов соединены между собой не электросваркой, как у современных котлов, а заклепочными швами. Щелочная хрупкость заклепочных соединений может явиться причиной разрыва барабана.

При проверке заклепок барабана, проработавшего около 15 лет при давлении 20 ат, была обнаружена их коррозия по изменению звука. После удаления головок заклепок оказалось, что их сечение было на три четверти разрушено коррозией. Эксплуатация этого котла при таком состоянии барабана могла бы привести к разрыву последнего. У другого котла при ревизии было обнаружено, что несколько заклепок на барабанах ослабло, на что не обратили должного внимания. Вскоре после этого во время работы котла произошел разрыв барабана, отдельные куски которого вылетели через крышу и упали в десятках метров от здания котельного цеха. Котел был разрушен настолько, что его пришлось демонтировать.

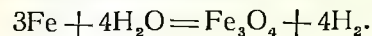
Развитие щелочной хрупкости металла в паровом котле возможно прежде всего в том случае, когда в котловой воде растворена щелочь; ею обычно является едкий натр. Воздействию щелочи на металл препятствует наличие накипи в трубах. Щелочной хрупкости не наблюдалось у многих сильно изношенных котлов старой конструкции, работавших по несколько десятилетий при накипном водном режиме. Однако, когда отдельные из этих котлов перевели на безнакипный режим с поддержанием относительно высокой щелочности котловой

воды, трещины, связанные со щелочной хрупкостью, появились уже после 1—2 лет эксплуатации.

Необходимым условием щелочной хрупкости является наличие в металле небольших начальных трещин или щелей; металл разрушается по границам зерен феррита, лежащих у этих щелей или трещин.

Разрушение вследствие щелочной хрупкости происходит только в том случае, если металл подвержен механическим напряжениям, которые способствуют постепенному увеличению щелей и трещин.

Механизм щелочной хрупкости точно не установлен. Считается, что она развивается за счет реакции



В данной реакции едкий натр непосредственно не участвует. Разрушение металла происходит сначала очень медленно, а затем постепенно ускоряется.

При вырубании обнаруженных трещин металл легко выкрашивается. Иногда отдельные его куски можно даже отламывать рукой. Создается представление, что элементы котла чрезвычайно хрупки, отчего такие повреждения и были названы щелочной или каустической хрупкостью.

В клепаных барабанах котлов старой конструкции этот вид коррозии возникает вследствие того, что заклепочные швы с течением времени теряют плотность и в образующиеся щели просачивается небольшое количество котловой воды. Чаще всего это происходит в нижних барабанах у трехбарабанных котлов, которые неравномерно омываются водой и сравнительно сильно изгибаются при растопке и прекращении работы котла. При этом котловая вода может просачиваться как в щели между склепанными стальными листами, так и в зазоры между листами и заклепками.

Три трехбарабанных котла, рассчитанных на давление 17 ат, с 1934 г. работали на накипном режиме. В 1950 г. была пущена натрий-катионитовая установка; котлы были переведены на безнакипный режим и очищены от накипи. Примерно через 1,5 года эксплуатации в котлах стали появляться повреждения заклепочных швов (рис. 60).

Возможно, что трещины в металле барабанов были и до внедрения безнакипного режима, поскольку условия работы металла были очень тяжелыми. Но эти трещины увеличились до опасных размеров лишь тогда, когда исчезла накипь и появилась коррозия [Л. 4].

Из этого примера нельзя, конечно, делать вывод о целесообразности сохранения накипного режима котловой воды, при котором возникают другие трудности.

Щелочная хрупкость может появиться и у современных котлов со сварными барабанами. В частности, под

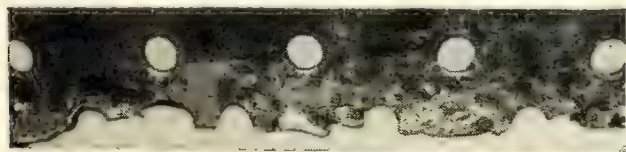


Рис. 60. Разрыв обечайки котельного барабана по заклепочному шву, разрушенному в результате щелочной хрупкости.

действием щелочной хрупкости ускоряется расширение трещин тепловой усталости.

Весьма эффективным замедлителем процесса щелочной хрупкости являются фосфаты, почти всегда вводимые в котловую воду. Они способствуют созданию антикоррозионной пленки и замедляют разрушение стали.

24. КОРРОЗИЯ ТРУБ ПОД СЛОЕМ ШЛАМА

Описанные выше виды коррозии вызываются непосредственным воздействием соответствующих веществ на металлические поверхности парового котла. Существует и иной вид коррозионных разрушений. Разъедание металла может происходить при его взаимодействии с лежащими на его поверхности продуктами коррозии: окислами железа и меди. Такая коррозия является вторичной. Для ее возникновения требуется, чтобы в самом котле, питательном тракте или конденсаторе паровой турбины происходила первичная коррозия металла. Продукты этой коррозии, попадая в котел, могут вместе с другими находящимися в котловой воде веществами отлагаться на поверхностях нагрева в виде слоя шлама. При этом возникают отдельные элементарные участки электролиза, в которых металл труб становится анодом, а продукты коррозии — катодом. Слабые электрические токи приводят к постепенному разрушению основного металла и соответствующему увеличению слоя его окислов, вследствие чего процесс коррозии с течением

времени ускоряется. При этом возникают отдушины вследствие уменьшения толщины стенки или чрезмерного нагрева стенок трубы, а при сквозном разъедании — свищи.

Наибольшие отложения образуются в зоне максимальной тепловой нагрузки, т. е. в экраннх трубах против ядра факела, где и возникают коррозионные разрушения. Отложение окислов металла происходит также в барабанах котла и нижних коллекторах экранов. В экономайзере продукты коррозии выпадают преимущественно при длительной работе котла с очень малой нагрузкой или при систематическом пребывании его в горячем резерве.

Места отложения окислов металлов не вполне совпадают с местами отложения других видов шлама. Тяжелые окислы железа и меди не могут в большом количестве переноситься водой по длине барабана, внутри которого вода движется с малой скоростью, поэтому в соленые отсеки ступенчатого испарения они попадают в относительно меньшем количестве, чем другие виды шлама. Их отложения на поверхностях нагрева возникают не только в соленых, но и в чистом отсеке.

Кислород может попасть в котел с питательной водой не только вследствие неполного его удаления в деаэраторе, но и через неплотности в конденсаторе паровой турбины, через которые в конденсат просачивается охлаждающая вода с растворенным в ней кислородом. Кроме того, так как температура в конденсаторе равна температуре кипения воды при имеющемся там очень малом давлении, кислород выделяется в нем и вызывает коррозию латунных трубок. Продукты этой коррозии — окислы меди — попадают в паровой котел и, отлагаясь на поверхностях нагрева, создают очаги еще более сильной коррозии, чем окислы железа.

Борьба с отложениями окислов железа и меди в основном должна вестись по линии предотвращения первичной коррозии металла. Кроме упомянутых выше видов первичной коррозии, опасным является также действие уголекислоты, которая попадает в питательный тракт главным образом при разложении бикарбонатов. До экономайзера парового котла свободная уголекислота обычно не доходит. Под ее действием разрушаются питательные насосы, регенеративные подогреватели, пита-

тельные трубопроводы и пр., а образующиеся окислы железа и меди выносятся водой в котел.

Для борьбы с такой коррозией рекомендуется систематическое удаление углекислоты из отдельных теплообменных аппаратов, в которых она накапливается над слоем воды.

Коррозия под слоем шлама может происходить с большой интенсивностью при вполне удовлетворительной деаэрации питательной воды и отсутствии каких-либо видимых ненормальностей в работе самого котла. Весьма опасным может оказаться и действие технологической окалины, оставшейся на внутренней поверхности труб после их изготовления на заводе, а также ржавчины, которой могут покрываться трубы во время хранения до начала монтажа котла.

Содержание окислов железа и меди в питательной и котловой воде должно периодически проверяться.

На одной из ТЭЦ у котлов типа ТП-170-1 паропроизводительностью 170 т/ч при температуре пара 510°С стали систематически появляться свищи на экранных трубах в зоне максимального тепловосприятия, находящейся на 1—2 м выше зажигательного пояса (станция работала на угле марки АШ).

Ремонт большинства труб состоял в наплавке металла в месте образования свищей. Несколько поврежденных участков труб вырезали. Внутри этих труб обнаружили отложения шлама, состоявшего на 60—70% из окислов железа и на 10—20% — из окислов меди. Под этими отложениями металл был сильно поражен коррозией. Вне границ отложения шлама разведение металла отсутствовало. Налицо была типичная коррозия под слоем шлама, при которой, как уже упоминалось, окислы железа и меди являются катодом, а основной металл трубы — анодом и разрушение основного металла сопровождается соответствующим увеличением слоя окислов, а также ускорением дальнейшего процесса коррозии.

В экранях чистого отсека ступенчатого испарения свищи появлялись большей частью над заводскими сварными стыками (рис. 61). В экранях соленых отсеков большинство свищей возникало вдали от сварных стыков, обычно на гусах труб, а иногда и на прямых участках.

Отложение в трубах окислов железа и меди было связано с их чрезмерным содержанием в питательной воде. Это вызывалось многими причинами, но прежде всего высоким содержанием окислов железа в конденсате, возвращаемом на ТЭЦ от близлежащего химического завода.

Вполне закономерно, что при наличии в котловой воде большого количества взвешенных частиц они выпадали в зоне максимального тепловосприятия труб. Закономерным было и их преимущественное выпадение на неровностях вблизи сварных стыков или в местах наибольшей концентрации, т. е. в соленых отсеках.

В гл. 3 указывалось, что до 1957 г. при автоматической сварке на заводе экранных труб внутри них оставался кольцевой выступ, который в горячем состоянии разглаживался дорном. Чем выше был кольцевой выступ, тем больше завихрял он проходивший в трубе пароводяной поток и тем легче возникало за выступом начальное отложение окислов железа и меди. Высота кольцевого выступа определялась диаметром дорна и увеличивалась по мере его износа.

Для ликвидации повторных повреждений экранных труб был осуществлен ряд мероприятий по уменьшению содержания окислов железа и меди в питательной воде; котлы подвергли кислотной промывке, а пораженные коррозией участки труб были заменены.

25. СТОЯНОЧНАЯ КОРРОЗИЯ

Стояночную коррозию нельзя рассматривать как особый вид разрушения металла, отличный от описанных выше других видов коррозии. Большей частью стояночная коррозия заключается в ржавлении влажных металлических поверхностей при выключении оборудования из работы, т. е. в обычной кислородной коррозии в условиях свободного доступа воздуха. При последующем включении котла в работу тонкий слой продуктов этой коррозии остается на трубах или смывается с них водой и осаждается вместе с другими солями в зоне максимального обогрева экранных труб, вызывая описанную выше коррозию под слоем шлама.

Стояночная коррозия почти не проявлялась в военные и первые послевоенные годы, когда советским электростанциям, как правило, приходилось работать с полной нагрузкой и без резерва. Появление в энергетических системах резервной мощности привело к тому, что часть оборудования начали периодически останавливать, оставляя в резерве. Это относится прежде всего к старым, менее экономичным котлам и турбинам.

При этом выявился новый вид коррозии — стояночная коррозия.

Стояночная коррозия происходит преимущественно

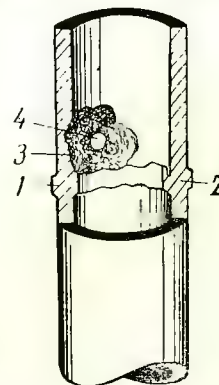


Рис. 61. Вид в разрезе экранной трубы котла ТП-170-1, рассчитанного на давление 100 ат, с коррозией над контактным сварным стыком.

1 и 2 — сварной стык;
3 — зона коррозии; 4 — сквозной свищ.

под отложениями шлама, в которых удерживается влага после спуска воды из котла. В барабанах котлов иногда обнаруживают коррозионные язвы у торцов и по нижней образующей, т. е. в местах, где отлагается шлам.

Для парового котла опасна не только его собственная стояночная коррозия, но и коррозия во всем пароводяном тракте: во всех подогревателях, теплообменниках, деаэраторах и т. д. Продукты этой коррозии вносятся в котел, где они, отлагаясь на поверхностях нагрева, задерживают влагу после спуска воды и значительно усиливают электрические токи, способствующие коррозионному разрушению металла.

Для предотвращения стояночной коррозии разработаны различные способы консервации котлов.

На электростанции был закончен монтаж котла нового типа паропроизводительностью 230 т/ч при давлении 100 ат. В первые полгода его многократно включали в работу на срок менее 1 суток и затем останавливали для различных переделок и усовершенствований. Наконец, котел проработал под нагрузкой в течение 2 недель, после чего он был выключен и осмотрен. При осмотре были обнаружены отдушины у 14 труб заднего экрана в зоне их максимального обжига. Изменение структуры металла свидетельствовало о чрезмерном нагреве.

Внутри поврежденных труб были найдены отложения оранжевого цвета, состоявшие почти полностью из окислов железа. Такие отложения могли возникнуть только при свободном доступе кислорода к разъедаемой поверхности металла.

Нельзя предположить, что продукты коррозии образовались во время монтажа котла, остались на трубах при его щелочении, а затем во время 2-недельной работы отделились от труб и снова осели на них в зоне максимального обжига. Основная часть окислов железа могла выделиться только вследствие стояночной коррозии при многократных кратковременных включениях котла в работу и последующих длительных остановках.

Замена поврежденных участков экранных труб совпала с окончанием первичной наладки котла; он стал устойчиво нести нагрузку, и коррозионных разъеданий больше не было.

26. НАРУЖНАЯ КОРРОЗИЯ ЭКРАННЫХ ТРУБ

Впервые наружная коррозия экранных труб была обнаружена на двух электростанциях у котлов высокого давления ТП-230-2, работавших на угле марки АШ и сернистом мазуте и находившихся до того в эксплуатации около 4 лет. Наружная поверхность труб подвергалась коррозионному разъеданию со стороны, обращенной в топку, в зоне максимальной температуры факела.

Разрушались преимущественно трубы средней (по ширине) части топки, непосредственно над зажигательным лоясом. Широкие и относительно неглубокие коррозионные язвы имели неправильную форму и часто смыкались между собой, вследствие чего поврежденная поверхность труб была неровной, бугристой. В середине наиболее глубоких язв появились свищи, и через них начали вырываться струи воды и пара.

Характерным было полное отсутствие такой коррозии на экранных трубах котлов среднего давления этих электростанций, хотя котлы среднего давления находились там в эксплуатации значительно более длительное время.

В последующие годы наружная коррозия экранных труб появилась и на других котлах высокого давления, работавших на твердом топливе. Зона коррозионных разрушений распространялась иногда на значительную высоту; в отдельных местах толщина стенок труб в результате коррозии уменьшалась до 2—3 мм. Было замечено также, что эта коррозия практически отсутствует в котлах высокого давления, работающих на мазуте.

Наружная коррозия экранных труб была обнаружена у котлов ТП-240-1 после 4 лет эксплуатации, работающих при давлении в барабанах 185 ат. В этих котлах сжигался подмосковный бурый уголь, имевший влажность около 30%; мазут сжигали только при растопке. У этих котлов коррозионные разрушения также возникали в зоне наибольшей тепловой нагрузки экранных труб. Особенность процесса коррозии заключалась в том, что трубы разрушались как со стороны, обращенной в топку, так и со стороны, обращенной к обмуровке (рис. 62).

Эти факты показывают, что коррозия экранных труб зависит прежде всего от температуры их поверхности. У котлов среднего давления вода испаряется при температуре около 240° С; у котлов, рассчитанных на давление 110 ат, расчетная температура кипения воды равна 317° С; в котлах ТП-240-1 вода кипит при температуре 358° С. Температура наружной поверхности экранных труб обычно превышает температуру кипения примерно на 30—40° С.

Можно предположить, что интенсивная наружная коррозия металла начинается при повышении его температуры до 350° С. У котлов, рассчитанных на давление 110 ат, эта температура достигается лишь с огневой

стороны труб, а у котлов, имеющих давление 185 ат, она соответствует температуре воды в трубах. Именно поэтому коррозия экранных труб со стороны обмуровки наблюдалась только у этих котлов.

Подробное изучение вопроса было произведено на котлах ТП-230-2, работавших на одной из упомянутых электростанций¹. Там отбирались пробы газов и горя-

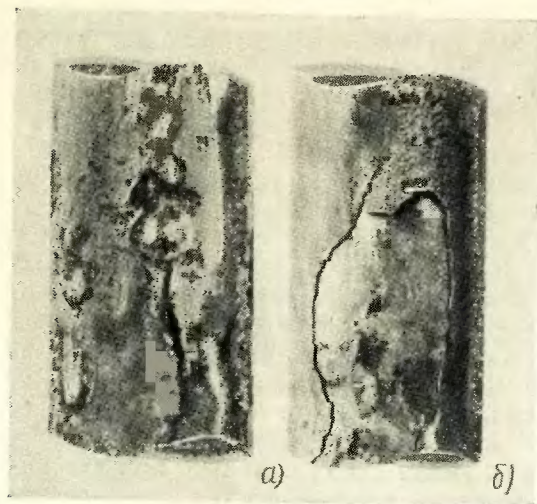


Рис. 62. Наружная коррозия экранных труб диаметром 60×6 мм, изготовленных из стали марки 15ХМ, у котла ТП-240-1, работающего при давлении в барабане 185 ат.

а — вид со стороны, обращенной к обмуровке; б — вид со стороны, обращенной в топку.

щих частиц из факела на расстоянии около 25 мм от экранных труб. Близ фронтного экрана в зоне интенсивной наружной коррозии труб топочные газы почти не содержали свободного кислорода. Вблизи же заднего экрана, у которого наружная коррозия труб почти отсутствовала, свободного кислорода в газах было значительно больше. Кроме того, проверка показала, что в районе образования коррозии более 70% проб газов

содержало в себе сероводород. В зонах отсутствия коррозии сероводород был обнаружен лишь в единичных пробах газов.

Можно предположить, что в присутствии избыточного кислорода сероводород сгорает и коррозии не происходит. Но при отсутствии избыточного кислорода сероводород вступает в химическое соединение с металлом труб. При этом образуется сульфид железа FeS . Этот продукт коррозии действительно был найден в отложениях на экранных трубах.

Наружной коррозии подвержена не только углеродистая сталь, но и хромомолибденовая. В частности, у котлов ТП-240-1 коррозия поражала экранные трубы, изготовленные из стали марки 15ХМ.

До сих пор отсутствуют проверенные мероприятия для полного предупреждения описанного вида коррозии. Некоторое уменьшение скорости разрушения металла достигалось после наладки процесса горения, в частности при увеличении избытка воздуха в топочных газах.

27. КОРРОЗИЯ ЭКРАНОВ ПРИ СВЕРХВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

В этой книге вкратце рассказано об условиях работы металла паровых котлов современных электростанций. Но прогресс энергетики в СССР продолжается, и теперь вступает в строй большое число новых котлов, рассчитанных на более высокие давления и температуры пара. В этих условиях большое значение имеет практический опыт эксплуатации нескольких котлов ТП-240-1, работающих с 1953—1955 гг. при давлении 175 ат (185 ат в барабане). Весьма ценны, в частности, сведения о коррозии их экранов.

Экраны этих котлов были подвержены коррозии как с наружной, так и с внутренней стороны. Их наружная коррозия описана в предыдущем параграфе этой главы, разрушение же внутренней поверхности труб не похоже ни на один из описанных выше видов коррозии металла¹.

Разъедание происходило в основном с огневой стороны верхней части наклонных труб холодной воронки и сопровождалось появлением коррозионных раковин (рис. 63,а). В дальнейшем число таких раковин увеличивалось, и возникала сплошная полоса (иногда две параллельные полосы) разъеденного металла (рис. 63,б). Характерным являлось также отсутствие коррозии в зоне сварных стыков.

¹ См. «Электрические станции», 1959, № 9.

¹ «Электрические станции», 1958, № 5.

Внутри труб имелся налет рыхлого шлама толщиной 0,1—0,2 мм, состоявшего в основном из окислов железа и меди. Увеличение коррозионного разрушения металла не сопровождалось увеличением толщины слоя шлама, следовательно, коррозия под слоем шлама не была основной причиной разъедания внутренней поверхности экранных труб.

В котловой воде поддерживался режим чистофосфатной щелочности. Фосфаты вводились в котел не непрерывно, а периодически.

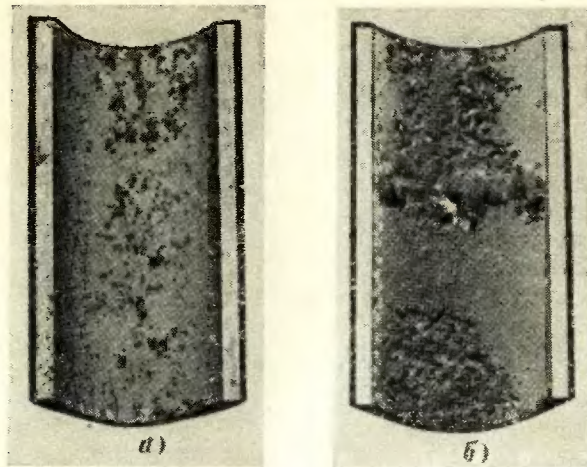


Рис. 63. Коррозия внутренней поверхности наклонных труб ($d=60 \times 6$ мм, материал — сталь марки 15ХМ) холодной воронки котла ТП-240-1.

a — начальная стадия коррозии; *b* — сильная коррозия.

и их содержание иногда снижалось почти до нуля. При отсутствии щелочности котловая вода при высоком давлении приобретала слабодокислительную реакцию, что также способствовало ускоренному разрушению экранных труб.

Большое значение имело то обстоятельство, что температура металла труб периодически резко повышалась и иногда была выше 600°C (рис. 64). Зона наиболее частого и максимального повышения температуры совпадала с зоной наибольшего разрушения металла. Снижение давления в котле до 140—165 ат (т. е. до давления, при котором работают новые серийные котлы) не изменяло характера временного повышения температуры труб, но сопровождалось значительным снижением максимального значения этой температуры. Причины такого периодического повышения температуры огневой стороны наклонных труб холодной воронки еще подробно не изучены.

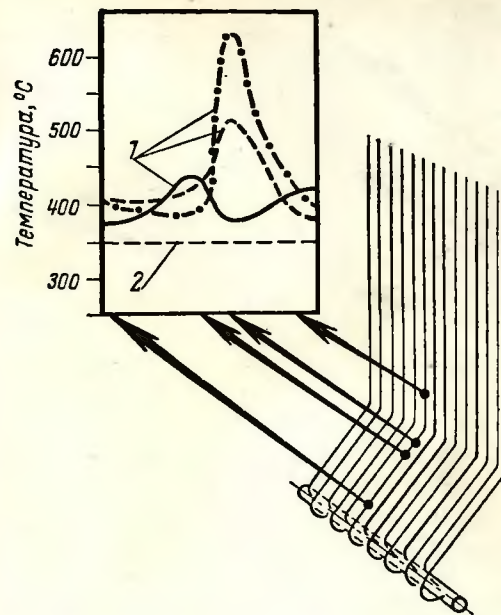


Рис. 64. Схема изменения температуры металла по высоте экранной трубы котла ТП-240-1 (по материалам ВТИ).

1 — температура огневой стороны труб при нагрузке котла 230 т/ч и различных режимах работы топки; 2 — температура насыщения при давлении 182 ат.

28. СЕРНИСТАЯ КОРРОЗИЯ ТРУБ ХВОСТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

При низкой температуре дымовых газов происходит конденсация содержащегося в них пара на трубах хвостовых поверхностей нагрева котла. В образующихся капельках воды (росе) растворяются имеющиеся в газах окислы серы, в результате чего получаются слабые растворы кислот, интенсивно разъедающие металл.

В экономайзере температура воды обычно выше 100°C , и такая коррозия может возникнуть лишь в редких случаях (например, при наличии течи в сварных стыках, если котел работает на сернистом мазуте). В воздухоподогревателях котлов старой конструкции температура дымовых газов настолько высока, что его коррозия происходит лишь при сжигании немногих топлив с высо-

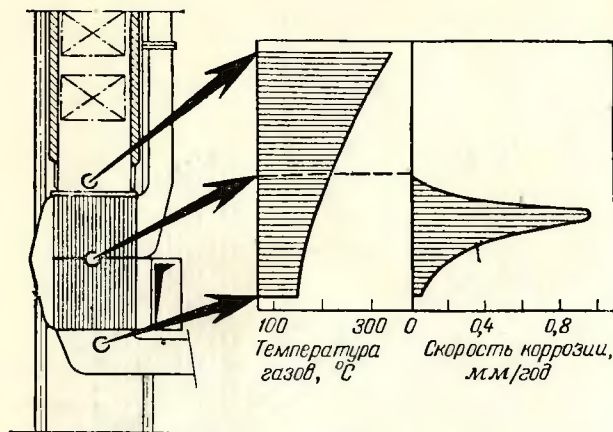


Рис. 65. Схема изменения коррозии по высоте трубчатого воздухоподогревателя.

ким содержанием влаги и серы. У новых типов котлов уходящие газы имеют температуру 120—150°С, а иногда и ниже. В них опасность коррозии значительно больше.

Интенсивная коррозия происходит обычно лишь в узкой зоне, в которой выпадает роса (рис. 65). Трубы приходится удалять, когда в них разрушен только небольшой участок, однако и при этом часть времени воздухоподогреватель работает с неплотными трубами, т. е. при большой утечке воздуха в дымовые газы. Через дутьевые вентиляторы и дымососы проходит дополнительное количество воздуха, не участвующего в горении. Соответственно понижается экономичность работы котла.

Разрушение металла воздухоподогревателя наиболее интенсивно на электростанциях, сжигающих в качестве основного топлива сернистый мазут. Многие из этих электростанций успешно применяют присадку в газы магнезита. Щелочные присадки (магнезит, доломит, известь) нейтрализуют действие сернистых газов. На трубах воздухоподогревателя отлагается рыхлый, сравнительно мало агрессивный налет, легко удаляемый с помощью дробеструйных устройств. Удовлетворительные результаты получаются при дозировании магнезита в количестве 1 кг на тонну сжигаемого мазута.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев А. П., *Металловедение*, 3-е издание, Оборонгиз, 1956.
2. Химушин Ф. Ф., *Нержавеющие кислотоупорные и жаропрочные стали*, Металлургиздат, 1945.
3. Ларичев В. А., *Качественные стали для современных котельных установок*, Госэнергоиздат, 1951.
4. Акользин П. А., *Коррозия металла паровых котлов*, Госэнергоиздат, 1957.
5. Данилов Ф. А., Глейберг А. З. и Балакин В. Г., *Производство стальных труб горячей прокаткой*, Металлургиздат, 1954.
6. Бейн Э., *Влияние легирующих элементов на свойства стали*, Металлургиздат, 1945.
7. Уманский Я. С., Финкельштейн Б. Н., Блантер М. Е., Кишкин С. Т., Фастов Н. С. и Горелик С. С., *Физические основы металловедения*, Металлургиздат, 1955.
8. Троянский Е. А., *Металлы котлостроения и расчет прочности котлов*, Госэнергоиздат, 1956.
9. Уваров В. В., Шнурков М. Е., Лапицкая Е. М. и Суворцева Е. О., *Производство основных элементов котлоагрегатов*, Машгиз, 1956.
10. Мамет А. П., *Коррозия теплосилового оборудования электростанций*, Госэнергоиздат, 1952.
11. Одинг И. А., *Основы прочности металлов паровых котлов, турбин и турбогенераторов*, Госэнергоиздат, 1949.
12. Михайлов-Михеев П. Б., *Металл в современном котлостроении*, ОНТИ — Госэнергоиздат, 1937.
13. Керцелли Л. И., Рыжкин В. Я., Трояновский Б. М. и Шухер С. М., *Тепловая электрическая станция большой мощности*, Библиотека теплотехника, Госэнергоиздат, 1959.
14. Ковалев А. П. и Катковская К. Я., *Котельные агрегаты*, ч. II, Госэнергоиздат, 1953.
15. Мейкляр М. В., *Паровые котлы с естественной циркуляцией*, 2-е издание, Госэнергоиздат, 1958.
16. Мейкляр М. В., *Современный паровой котел*, Библиотека теплотехника, Госэнергоиздат, 1959.
17. Беляев Н. М., *Сопротивление материалов*, 9-е издание, Техтеориздат, 1954.

21

498437

ДЕРЖАВНА НАУКОВА
БІБЛІОТЕКА
ІМ. КОРОЛЕНКА ЛАВРІЙ
№ А. 74957
19 7.7.613

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Характер опечатки
43	Первая снизу	Эта строка должна быть над рис. 32 из стр. 45

М. В. Мейкляр—Как работает металл парового котла.